

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Návrh pohonu zdvihového vrátku 10t s asynchronním
motorem a měničem kmitočtu**

**Design of Hoist Winch 10t with Asynchronous Motor
and Frequency Converter**

2011

Bc. Ladislav Řehánek

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 6. 5. 2011

Ladislav Řehánek

Na tomto místě bych rád poděkoval Ing. Václavu Čechovi, Ph.D. za rady a věcné připomínky při tvorbě a zpracování mé diplomové práce.

Abstrakt

Cílem této diplomové práce je modernizace zdvihového vrátku 10t, který je součástí elektrického zařízení jeřábu HM1000. Vrátek je v současné době tvořen skupinou elektrických komponentů, které jsou dnes již značně zastaralé. Jejich údržba a řešení poruchových stavů jsou finančně i časově velmi náročné, neboť zmíněné komponenty se již řadu let nevyrábí, a proto je nutno vždy nalézt adekvátní náhradu, která bude splňovat jak mechanické tak i elektrické parametry nahrazované součásti.

Jako další aspekt tohoto řešení bylo zvýšení životnosti jednotlivých funkčních celků a návrh kompletního pohonu s elektromotorem, který bude pracovat s větší efektivitou a menšími ztrátami, než doposud provozovaný pohon vybavený asynchronním elektromotorem s kotvou kroužkovou.

Zároveň musí návrh v plné míře odpovídat současně platným normám, vyhláškám a zákonům vztahujícím se na strojní a elektrické zařízení.

Klíčová slova

Vrátek, elektromotor, pohon, převodovka, měnič kmitočtu, brzdový rezistor, tlumivka, oteplení, rozvaděč.

Abstract

The thesis is focused on modernization of 10t winch that is a part of electrical equipment of HM1000 crane. At present winch is made of discontinued electrical components. Maintenance and problem solving costs lot of financial and technical resources, all broken parts needs to be replaced by suitable spare parts. Mechanical dimensions and electrical parameters of these spares have to fit replaced parts.

The thesis includes concept of a new drive with electric motor that brings more efficiency and smaller loss than asynchronous electric motor with ring armature used at present. Operating lifetime is another important point of this solution.

The new concept has to match all mechanical and electrical standards, noticek and laws.

Keywords

Winch, electric motor, drive, gear, frequency converter, breaking rezistor, choke, temperature rise, cabinet.

Seznam použitých symbolů a zkratek

A	- Plocha rozhraní	[m^2]
A_b	- Plocha povrchu základny	[m^2]
A_e	- Účinný chladič povrch	[m^2]
A_0	- Povrch jednoho krytu	[m^2]
a	- Zrychlení	[$m.s^{-2}$]
b	- Činitel povrchu	
c	- Činitel respektující rozložení teploty v rozvaděči	
$\cos\varphi$	- Účinník	
d	- Průměr bubnu	[mm]
d_L	- Průměr lana	[mm]
F_H	- Tažná síla na laně	[N]
f	- Činitel výška/základna	
g	- Tíhové zrychlení	[$m.s^{-2}$]
h	- Výška krytu	[m]
I	- Elektrický proud	[A]
$I_{motormax}$	- Maximální proud elektromotoru	[A]
IP	- Stupeň krytí elektrického zařízení	
$I_{\mu n}$	- Magnetizační proud	[A]
i	- Jmenovitý převod převodovky	
J_{motor}	- Moment setrvačnosti elektromotoru a převodovky	[$kg.m^2$]
$J_{zát}$	- Moment setrvačnosti zátěže	[$kg.m^2$]
k	- Konstanta krytu	[$Wm^{-2}K^{-1}$]
M_{bmotor}	- Urychlující moment elektromotoru	[Nm]
$M_{bzát}$	- Urychlující moment zátěže	[Nm]
M_{eff}	- Efektivní moment	[Nm]
M_m	- Vypočtený minimální moment elektromotoru	[Nm]
M_{motor}	- Moment elektromotoru při urychlování	[Nm]
M_n	- Jmenovitý moment elektromotoru	[Nm]
M_p	- Moment na výstupní straně převodovky	[Nm]
m	- Hmotnost zátěže	[kg]
$n_{motormax}$	- Maximální otáčky elektromotoru	[ot/min]
n_n	- Jmenovité otáčky elektromotoru	[ot/min]
P	- Výkon	[W]
$P_{brmotormax}$	- Maximální brzdňý výkon	[W]
$P_{brWkonst}$	- Maximální brzdňý výkon při konstantní rychlosti	[W]
$P_{brWmaxb}$	- Maximální brzdňý výkon při zrychlování	[W]
$P_{brWmaxv}$	- Maximální brzdňý výkon při zpomalování	[W]
P_m	- Minimální požadovaný výkon elektromotoru	[W]
P_{mkonst}	- Výkon elektromotoru v generátorickém režimu	[W]
P_n	- Jmenovitý výkon elektromotoru	[W]
R	- Elektrický odpor	[Ω]
t_b	- Doba rozběhu pohonu	[s]
t_k	- Doba zdvihu a spouštění břemene	[s]

t_p	- Doba klidu	[s]
t_v	- Doba brzdění	[s]
U_n	- Jmenovité napětí	[V]
W_{br}	- Brzdná energie	[Ws]
z	- Zatěžovatel	[%]
α_{motor}	- Úhlové zrychlení elektromotoru	[s ⁻²]
ΔP	- Ztrátový výkon	[W]
ΔP_s	- Ztrátový výkon při skutečném zatížení	[W]
$\Delta \vartheta_{05}$	- Oteplení ve střední části rozvaděče	[K]
$\Delta \vartheta_{10}$	- Oteplení v horní části rozvaděče	[K]
η_p	- Účinnost převodovky	
Φ	- Tepelný tok	[W]
ϑ_c	- Teplota vnějšího prostředí	[°C]
ϑ_i	- Teplota vnitřního prostředí	[°C]

Obsah

1. Zdůvodnění návrhu pohonu vrátku 10t	9
2. Mechanický výpočet pro volbu elektromotoru	10
2.1 Tažná síla na laně	10
2.2 Moment na výstupní straně převodovky	10
2.3 Výkon elektromotoru	11
2.4 Moment elektromotoru	12
2.5 Maximální otáčky elektromotoru	12
2.6 Spouštění břemene při konstantním momentu zátěže	13
2.6.1 Výkon elektromotoru	15
2.6.2 Moment elektromotoru	15
3. Výběr elektromotoru	16
3.1 Výpočet úhlového zrychlení elektromotoru	17
3.2 Urychlující moment elektromotoru	18
3.3 Moment setrvačnosti zátěže	19
3.4 Urychlující moment zátěže	20
3.5 Zdvih, moment motoru při urychlování	20
3.6 Zdvih, moment motoru při zpomalování	21
3.7 Spouštění, moment motoru při urychlování	22
3.8 Spouštění, moment motoru při zpomalování	22
4. Stanovení maximálního brzdného výkonu	23
5. Dimenzování měniče kmitočtu	24
5.1 Výpočet maximálního proudu zvoleného elektromotoru	24
5.2 Frekvenční měnič a harmonické zkreslení	27
6. Volba brzdného rezistoru	29
6.1 Maximální brzdný výkon při zpomalování	30
6.2 Maximální brzdný výkon při urychlování	31
6.3 Brzdný výkon při konstantní rychlosti	32
6.4 Výpočet brzdné energie během jednoho cyklu	35
7. Kontrola oteplení elektromotoru	35
8. Výběr a návrh rozvaděče	38
8.1 Kontrola oteplení rozvaděče dle IEC 890	39
8.2 Výpočet ztrátového výkonu rozvaděče	41
8.3 Stanovení účinného chladicího povrchu krytu	43
8.4 Stanovení vnitřního oteplení vzduchu ve střední výšce rozvaděče	44
8.5 Stanovení vnitřního oteplení vzduchu v horní části rozvaděče	46
9. Kontrola oteplení rozvaděče softwarem PROCLIMA	50
10. Závěr	55
11. Seznam použité literatury a podkladů	56
12. Seznam příloh	57

1. Zdůvodnění návrhu pohonu vrátku 10t

Jeřáb HM1000 v provedení derikový jeřáb má všechny pohony řešeny pomocí elektromotorů, které jsou umístěny na jednotlivých mechanických převodovkách. Na otočné základně jsou umístěny čtyři vrátky zdvihů a dvě poháněcí jednotky otáčení. Na ocelové konstrukci vrátku HM100 je uchycen třífázový asynchronní elektromotor s kotvou kroužkovou typu H280 M08, který pohání buben přes pružnou čepovou spojku s brzdovým kotoučem a třístupňovou kuželočelní převodovku. Buben je jednou stranou uložen v ložiskovém tělese a druhou stranou uchycen na výstupní hřídel převodovky. Vrátek má drážkovaný buben, který je určen pro lano o průměru 31,5 mm. Vrátek je dále osazen regulační čelistovou brzdou s elektrohydraulickým odbrzdovačem typu ELHY S1125cR. Na ložiskovém tělese je uchycen vřetenový vypínač, jehož náhon je napojen na hřídel bubnu. Tento vypínač vypíná pohon vrátku po navinutí předem nastavené délky lana.

Hlavní pohon vrátku tvoří v současné době třífázový asynchronní elektromotor s kotvou kroužkovou typu H280M08. Spouštění tohoto elektromotoru je realizováno postupným vyřazováním skluzového odporu v kombinaci s řízením napětí na statorovém vinutí. Tato regulace se uplatňuje zejména u pohonů jeřábů v hutích a ve stavebnictví, neboť umožňuje jemnější a přesnější ovládání. Bývá provedena nejčastěji v kombinaci se stupňovitě spouštěnými odpory, případně s pevným odporem v rotorovém obvodu. V našem případě je použit první způsob s vyřazováním rotorového odporu. Logika regulace je provedena jako kontaktní. Vychýlením ovládací páky v požadovaném směru nahoru sepne kontakt směrového relé. Současně s vychýlením páky se otáčí potenciometr, který je součástí ovládače zdvihu. Tento potenciometr dává napětí od 0 do +10V na vstup regulátoru NOCONTA. Tyristory otevřou a motor se rozbíhá po odporové třífázové charakteristice až do okamžiku, kdy napětí z tachodynamy umístěného na hřídeli elektromotoru bude stejné hodnoty (opačného znaménka), jako napětí od potenciometru. V tom okamžiku tyristory zavřou a motor bude brzděn na jednofázové charakteristice. Při poklesu napětí z tachodynamy se opět tyristory otevřou a cyklus se opakuje, až do okamžiku kdy se otáčky ustálí na požadované hodnotě odvozené od vychýlení páky ovládače zdvihu. V konečné poloze ovládače spíná kontakt pro úplné vykrácení zdvihového odporu.

Vychýlením ovládací páky v požadovaném směru dolů sepne kontakt směrového relé. Současně s vychýlením páky se otáčí potenciometr a dává napětí od 0 do -10V na vstup regulátoru NOCONTA. Tyristory jsou zavřené a motor se rozbíhá po jednofázové charakteristice až do chvíle, kdy napětí z tachodynamy převýší (do plusové hodnoty) napětí od potenciometru. V tom okamžiku tyristory otevřou a motor bude brzděn na brzdě trojfázové charakteristice. Při poklesu napětí z tachodynamy tyristory opět zavřou a cyklus se opakuje až do ustálení požadovaných otáček. V konečném postavení páky je břemeno spouštěno na jednofázové charakteristice v rekuperační oblasti.

Jako nevýhody pro další provoz můžeme uvést několik důvodů:

- použití třífázového asynchronního motoru s kotvou kroužkovou, který vyžaduje pravidelnou kontrolu a údržbu sběracího ústrojí, které je tvořeno uhlíkovými kartáči a sběracími kroužky
- nemožnost objednání náhradního motoru typu H280M08 při opravách či poruše neboť jmenovaný motor se již nevyrábí

- aplikace regulátoru NOCONTA, který byl vyráběn v 70 a 80tých letech a v současné době neexistuje při poruše náhrada
- ztrátová regulace otáček

Hlavní výhody řízení zdvihu měničem frekvence:

- použitím měniče kmitočtu na zdvihu je možné odstranit starý systém přepínání rychlostí zdvihu pomocí stykačů jednotlivých stupňů
- regulací pohonu měničem kmitočtu se zpřesní manipulace s břemeny
- plynulý rozběh a zastavení pohybu zdvihu šetří mechanické části
- při brzdění zdvihu je využito dynamického brzdění měniče kmitočtu. Mechanická brzda bude nadále použita jako parkovací a nouzová při nouzovém zastavení. Tím se redukuje nutnost její opravy a častého seřizování.

2. Mechanický výpočet pro volbu elektromotoru

Zadané parametry:

Hmotnost zátěže	10000 kg
Průměr bubnu	$d = 0,8 \text{ m}$
Průměr lana	$d_L = 31,5 \text{ mm}$
Převodovka	$i = 71, \eta_p = 0,9$
Zadaný zatěžovatel	40%
Počet vrstev navíjecího lana	4
Max. rychlost navíjení	1. vrstva $v_{\max} = 25,8 \text{ m/min}$ 2. vrstva $v_{\max} = 27,6 \text{ m/min}$ 3. vrstva $v_{\max} = 29,5 \text{ m/min}$ 4. vrstva $v_{\max} = 31,2 \text{ m/min}$

2.1 Tažná síla na laně

$$F_H = m \cdot g = 10000 \cdot 9,81 = 98100 \text{ N} \quad (1)$$

2.2 Moment na výstupní straně převodovky

$$M_p = F_H \cdot \frac{d}{2} \quad (2)$$

Vzhledem k tomu, že se zdvihové lano navíjí do čtyř vrstev a výsledný moment je závislý na průměru lanového bubnu, musíme provést výpočet pro každou vrstvu lana zvlášť. Pro zjednodušení a praktický výpočet budeme předpokládat navíjení stylem lano na lano. Prakticky to znamená, že v první vrstvě bude průměr bubnu zachován, ale s každou následnou vrstvou musí být k této hodnotě připočten daný počet průměrů lana. Síla působí v ose lana, a proto musíme tuto skutečnost při výpočtů momentů zohlednit.

$$1. \text{ vrstva, průměr bubnu } d = 0,8 + 0,31 = 0,831 m \quad (3)$$

$$M_p = F_H \cdot \frac{d}{2} = 98100 \cdot \frac{0,831}{2} = 40760,55 Nm$$

$$2. \text{ vrstva, průměr bubnu } d = 0,8 + 3 \cdot 0,031 = 0,893 m \quad (4)$$

$$M_p = F_H \cdot \frac{d}{2} = 98100 \cdot \frac{0,893}{2} = 43801,65 Nm$$

$$3. \text{ vrstva, průměr bubnu } d = 0,8 + 5 \cdot 0,031 = 0,955 m \quad (5)$$

$$M_p = F_H \cdot \frac{d}{2} = 98100 \cdot \frac{0,955}{2} = 46842,75 Nm$$

$$4. \text{ vrstva, průměr bubnu } d = 0,8 + 7 \cdot 0,031 = 1,017 m \quad (6)$$

$$M_p = F_H \cdot \frac{d}{2} = 98100 \cdot \frac{1,017}{2} = 49883,85 Nm$$

2.3 Výkon elektromotoru

Pro výpočet výkonu elektromotoru je důležitý parametr max. navíjecí rychlost. Tato hodnota byla zadána v technické dokumentaci vrátku a je pro každou vrstvu lana uvedena. Při výpočtu rychlostí již nepočítáme s hodnotou průměru v ose lana, ale počítáme s konečnými průměry.

$$1. \text{ vrstva, max. rychlost navíjení } 25,8 \text{ m/min} = 0,43 \text{ m/s} \quad (7)$$

$$P_m = \frac{F_H \cdot v_{\max}}{\eta \cdot 10^3} = \frac{98100 \cdot 0,43}{0,9 \cdot 10^3} = 46,87 kW$$

$$2. \text{ vrstva, max. rychlost navíjení } 27,6 \text{ m/min} = 0,46 \text{ m/s} \quad (8)$$

$$P_m = \frac{F_H \cdot v_{\max}}{\eta \cdot 10^3} = \frac{98100 \cdot 0,46}{0,9 \cdot 10^3} = 50,14 kW$$

$$3. \text{ vrstva, max. rychlost navíjení } 29,5 \text{ m/min} = 0,49 \text{ m/s} \quad (9)$$

$$P_m = \frac{F_H \cdot v_{\max}}{\eta \cdot 10^3} = \frac{98100 \cdot 0,49}{0,9 \cdot 10^3} = 53,41 kW$$

4. vrstva, max. rychlost navíjení 31,2 m/min = 0,52 m/s (10)

$$P_m = \frac{F_H \cdot v_{\max}}{\eta \cdot 10^3} = \frac{98100 \cdot 0,52}{0,9 \cdot 10^3} = 56,68 \text{ kW}$$

2.4 Moment elektromotoru

1. vrstva (11)

$$M_m = \frac{M_p}{i \cdot \eta_p} = \frac{40760,55}{71 \cdot 0,9} = 637,88 \text{ Nm}$$

2. vrstva (12)

$$M_m = \frac{M_p}{i \cdot \eta_p} = \frac{43801,65}{71 \cdot 0,9} = 685,47 \text{ Nm}$$

3. vrstva (13)

$$M_m = \frac{M_p}{i \cdot \eta_p} = \frac{46842,75}{71 \cdot 0,9} = 733,06 \text{ Nm}$$

4. vrstva (14)

$$M_m = \frac{M_p}{i \cdot \eta_p} = \frac{49883,85}{71 \cdot 0,9} = 780,65 \text{ Nm}$$

2.5 Maximální otáčky elektromotoru

1. vrstva, průměr bubnu $d = 0,8 \text{ m}$ (15)

$$n_{motormax} = i \cdot \frac{v_{\max} \cdot 60}{\pi \cdot d} = 71 \cdot \frac{0,43 \cdot 60}{\pi \cdot 0,8} = 728,9 \text{ min}^{-1}$$

2. vrstva, průměr bubnu $d = 0,8 + 2 \cdot 0,031 = 0,862 \text{ m}$ (16)

$$n_{motormax} = i \cdot \frac{v_{\max} \cdot 60}{\pi \cdot d} = 71 \cdot \frac{0,46 \cdot 60}{\pi \cdot 0,862} = 723,633 \text{ min}^{-1}$$

$$3. \text{ vrstva, průměr bubnu } d = 0,8 + 4 \cdot 0,031 = 0,924 \text{ m} \quad (17)$$

$$n_{motor\max} = i \cdot \frac{v_{\max} \cdot 60}{\pi \cdot d} = 71 \cdot \frac{0,49 \cdot 60}{\pi \cdot 0,924} = 719,297 \text{ min}^{-1}$$

$$4. \text{ vrstva, průměr bubnu } d = 0,8 + 6 \cdot 0,031 = 0,986 \text{ m} \quad (18)$$

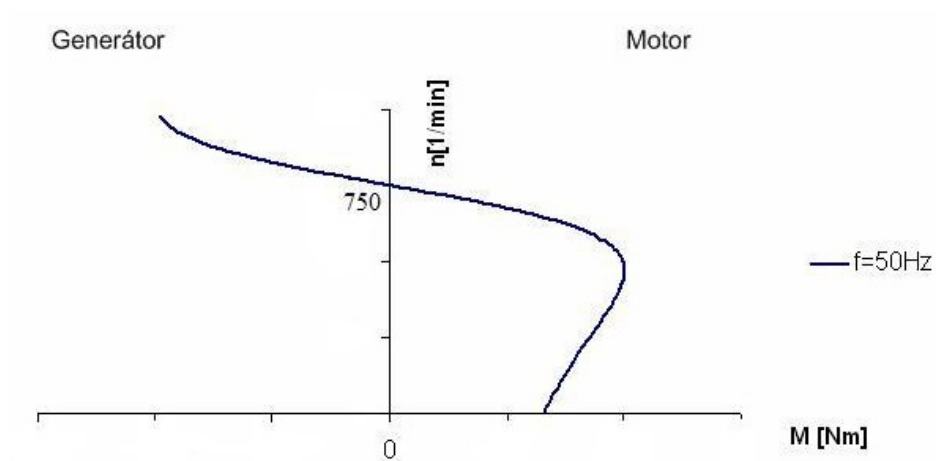
$$n_{motor\max} = i \cdot \frac{v_{\max} \cdot 60}{\pi \cdot d} = 71 \cdot \frac{0,52 \cdot 60}{\pi \cdot 0,986} = 715,272 \text{ min}^{-1}$$

2.6 Spouštění břemene při konstantním momentu zátěže

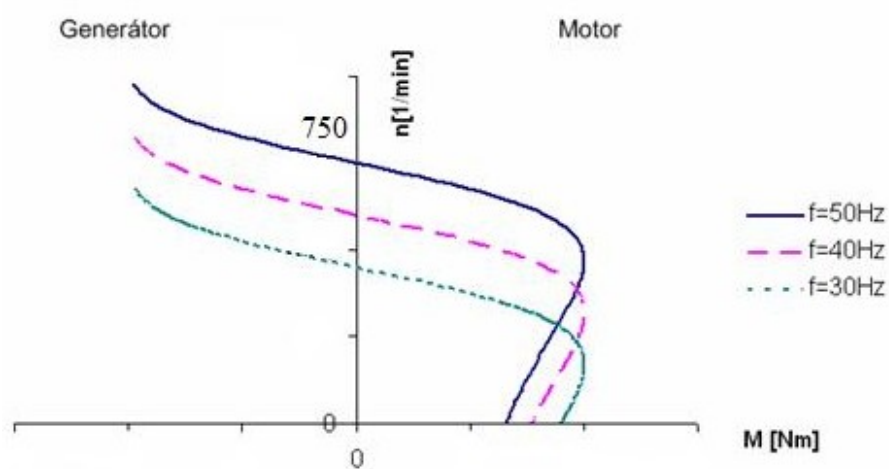
V tomto režimu se dostává asynchronní motor do stavu generátorického brzdění asynchronního motoru. Při tomto způsobu brzdění zůstává motor připojený na síť, tak jako kdyby pracoval v motorickém režimu. Nemění se ani směr otáčení rotoru, ale mění se jeho rychlost. Točivý moment způsobený zátěží (břemenem), působí ve stejném smyslu, jako točivý moment motoru. Jestliže se otáčky rotoru zvětší nad otáčky točivého pole (synchronní otáčky), změní se smysl relativní rychlosti vinutí rotoru k točivému poli statoru. Tím se změní smysl indukovaného napětí ve vinutí rotoru k točivému poli a současně i směr proudu rotoru. Vlivem toho, že se změní směr proudu rotoru, změní se i směr činné složky statorového proudu. Motor neodebírá činný proud, ale dodává ho do sítě a pracuje jako generátor. Jalová složka proudu statoru (magnetizační proud) zůstává stejná, jako kdyby motor pracoval v motorickém režimu. Motor odebírá ze sítě jalový proud, aby mohl dodávat do sítě činný proud. Otáčky rotoru jsou větší než otáčky točivého pole statoru. Vlivem toho bude skluz záporný a záporný bude i elektrický výkon rotoru.

Z tohoto je zřejmé, že asynchronní motor může v generátorickém režimu při přímém připojení k napájecí síti pracovat pouze v případě, kdy vstupní otáčky budou větší, než jsou synchronní otáčky motoru, které jsou pevně dány kmitočtem napájecí sítě $f = 50 \text{ Hz}$. V případě, kdy budeme požadovat generátorický chod i při nižších vstupních otáčkách, jeví se jako výhodné použít napájení pomocí frekvenčního měniče, který zajistí možnost generátorického brzdění i pro nižší otáčky, než jsou jmenovité otáčky použitého asynchronního motoru.

Uvedený případ je zřejmý z následujících obrázků.



Obr. 1 Mechanická charakteristika asynchronního motoru v motorickém a generátorickém režimu



Obr. 2 Mechanická charakteristika asynchronního motoru v motorickém a generátorickém režimu při frekvenčním řízení

2.6.1 Výkon elektromotoru

1. vrstva (19)

$$P_{mkonst} = -\frac{F_H \cdot v_{\max}}{10^3} \cdot \eta_p = -\frac{98100 \cdot 0,43}{10^3} \cdot 0,9 = -37,96 \text{ kW}$$

2. vrstva (20)

$$P_{mkonst} = -\frac{F_H \cdot v_{\max}}{10^3} \cdot \eta_p = -\frac{98100 \cdot 0,46}{10^3} \cdot 0,9 = -40,613 \text{ kW}$$

3. vrstva (21)

$$P_{mkonst} = -\frac{F_H \cdot v_{\max}}{10^3} \cdot \eta_p = -\frac{98100 \cdot 0,49}{10^3} \cdot 0,9 = -43,262 \text{ kW}$$

4. vrstva (22)

$$P_{mkonst} = -\frac{F_H \cdot v_{\max}}{10^3} \cdot \eta_p = -\frac{98100 \cdot 0,52}{10^3} \cdot 0,9 = -45,91 \text{ kW}$$

2.6.2 Moment elektromotoru

1. vrstva (23)

$$M_m = \frac{M_p}{i} \cdot \eta_p = \frac{40760,55}{71} \cdot 0,9 = 516,683 \text{ Nm}$$

2. vrstva (24)

$$M_m = \frac{M_p}{i} \cdot \eta_p = \frac{43801,65}{71} \cdot 0,9 = 555,232 \text{ Nm}$$

3. vrstva (25)

$$M_m = \frac{M_p}{i} \cdot \eta_p = \frac{46842,75}{71} \cdot 0,9 = 593,781 \text{ Nm}$$

$$M_m = \frac{M_p}{i} \cdot \eta_p = \frac{49883,85}{71} \cdot 0,9 = 632,33 \text{ Nm}$$

3. Výběr elektromotoru

Při výběru elektromotoru bylo vycházeno z jednotlivých vypočtených parametrů vrátku. Zvolený elektromotor musí splňovat následující podmínky:

- 1) Napájecí napětí statoru $U_n = 400\text{V AC}$ v síti 3PEN AC 50Hz 400V/TN-C
- 2) Výkon motoru musí být větší, než nejvyšší vypočtený výkon při zdvihu břemene.
 $P_n > 56,68 \text{ kW}$
- 3) Jmenovitý moment motoru musí být větší, než nejvyšší vypočtený moment při zdvihu břemene. $M_n > 780,65 \text{ Nm}$
- 4) Jmenovité otáčky motoru musí být vyšší, než nejvyšší otáčky, na které se může dostat spojka převodovky na straně motoru při spouštění břemene.
 $n_n > 728,9 \text{ min}^{-1}$

Byl zvolen 3f asynchronní elektromotor s kotvou nakrátko, výrobce SIEMENS typové řady 1LG4, který je vzhledem ke konstrukci svého izolačního systému ve třídě F vhodný pro provoz s měničem kmitočtu.

Parametry elektromotoru:

Typ	1LG4 313-8AB60-H57, snímač otáček 1XP8001-1
Velikost (osová výška)	315 mm
Jmenovitý výkon	75 kW
Počet pólů	8
Jmenovité napájecí napětí	400/690V 50 Hz
Jmenovitý proud	140A při 400V AC
Jmenovité otáčky	738 min^{-1}
$\cos \varphi$	0,93
Jmenovitý moment	971 Nm
Moment setrvačnosti	$2,48 \text{ kgm}^2$
Krytí	IP55
Kostra	šedá litina
Pro teplotu okolí	od -20°C do 40°C
Třída izolace	F
Pro nadmořskou výšku	do 1000 m
Pro trvalé zatížení	S1
Tvar	IMB3 patkový



Obr. 3 Asynchronní elektromotor řady 1LG4

Pro zajištění pohonu splňuje tento elektromotor typové řady 1LG4 všechny výše jmenované podmínky týkající se otáček, točivého momentu, výkonu a v neposlední řadě také osové výšky.

Nejpoužívanějšími elektromotory na celém světě jsou třífázové asynchronní motory. K vlastnostem těchto nejekonomičtějších a nejvíce používaných elektromotorů patří jejich robustní a jednoduchá konstrukce, jakož i vysoký stupeň krytí a standardizované typové velikosti. Jako hlavní výhodu oproti současnému použitému asynchronnímu elektromotoru s kotvou kroužkovou vidím ve vyšším krytí, absenci sběrného ústrojí v rotorovém obvodu, což má bezpochyby za důsledek bezúdržbový provoz motoru. Dále je třeba také zohlednit dostupnost tohoto motoru na trhu, což může mít v případě poruchy za následek významné zkrácení doby opravy zdvihového zařízení.

3.1 Výpočet úhlového zrychlení elektromotoru

1. vrstva, průměr bubnu $d = 0,8 \text{ m}$

Rozběhová rampa bude nastavena na hodnotu 5 s , a proto při lineárním průběhu zrychlení bude jeho hodnota

$$a = \frac{v}{t_r} = \frac{0,43}{5} = 0,086 \text{ m.s}^{-2} \quad (27)$$

$$\alpha_{motor} = i \cdot a_{max} \cdot \frac{2}{d} = 71 \cdot 0,086 \cdot \frac{2}{0,8} = 15,265 \text{ s}^{-2} \quad (28)$$

2. vrstva, průměr bubnu $d = 0,8 + 2 \cdot 0,031 = 0,863 \text{ m}$

$$a = \frac{v}{t_r} = \frac{0,46}{5} = 0,092 \text{ m.s}^{-2} \quad (29)$$

$$\alpha_{motor} = i \cdot a_{\max} \cdot \frac{2}{d} = 71 \cdot 0,092 \cdot \frac{2}{0,863} = 15,13 \text{ s}^{-2} \quad (30)$$

3. vrstva, průměr bubnu $d = 0,8 + 4 \cdot 0,031 = 0,924 \text{ m}$

$$a = \frac{v}{t_r} = \frac{0,49}{5} = 0,098 \text{ m.s}^{-2} \quad (31)$$

$$\alpha_{motor} = i \cdot a_{\max} \cdot \frac{2}{d} = 71 \cdot 0,098 \cdot \frac{2}{0,924} = 15,06 \text{ s}^{-2} \quad (32)$$

4. vrstva, průměr bubnu $d = 0,8 + 6 \cdot 0,031 = 0,986 \text{ m}$

$$a = \frac{v}{t_r} = \frac{0,52}{5} = 0,104 \text{ m.s}^{-2} \quad (33)$$

$$\alpha_{motor} = i \cdot a_{\max} \cdot \frac{2}{d} = 71 \cdot 0,104 \cdot \frac{2}{0,986} = 14,97 \text{ s}^{-2} \quad (34)$$

3.2 Urychlující moment elektromotoru

Při zjišťování jednotlivých parametrů pro modernizaci a konečný návrh zdvihového vrátku vyvstal problém s určením momentu setrvačnosti použité převodové skříně. Tato hodnota nebyla ani po důkladnějším zkoumání zjištěna. Vzhledem k tomu, že převodová skříň musí zůstat původní, bylo po dohodě přikročeno ke kroku navýšení momentu setrvačnosti elektromotoru koeficientem 1,2 násobku. Tato korekce má za následek určité zohlednění momentu setrvačnosti převodové skříně.

$$J_{motor} = 2,48 \cdot 1,2 = 2,97 \text{ kgm}^2 \quad (35)$$

1. vrstva (36)

$$M_{bmotor} = J_{motor} \cdot \alpha_{motor} = 2,97 \cdot 15,265 = 45,33 \text{ Nm}$$

2. vrstva (37)

$$M_{bmotor} = J_{motor} \cdot \alpha_{motor} = 2,97 \cdot 15,13 = 44,93 \text{ Nm}$$

3. vrstva (38)

$$M_{bmotor} = J_{motor} \cdot \alpha_{motor} = 2,97 \cdot 15,06 = 44,72 \text{ Nm}$$

4. vrstva (39)

$$M_{bmotor} = J_{motor} \cdot \alpha_{motor} = 2,97 \cdot 14,97 = 44,46 \text{ Nm}$$

3.3 Moment setrvačnosti zátěže

1. vrstva, $d = 0,8$ (40)

$$J_{zdt} = m \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 10000 \cdot \left(\frac{0,8}{2}\right)^2 = 1600 \text{ kgm}^2$$

2. vrstva, $d = 0,8 + 2 \cdot 0,031 = 0,862 \text{ m}$ (41)

$$J_{zdt} = m \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 10000 \cdot \left(\frac{0,862}{2}\right)^2 = 1857,61 \text{ kgm}^2$$

3. vrstva, $d = 0,8 + 4 \cdot 0,031 = 0,924 \text{ m}$ (42)

$$J_{zdt} = m \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 10000 \cdot \left(\frac{0,924}{2}\right)^2 = 2134,44 \text{ kgm}^2$$

4. vrstva, $d = 0,8 + 6 \cdot 0,031 = 0,986 \text{ m}$ (43)

$$J_{zdt} = m \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 = 10000 \cdot \left(\frac{0,986}{2}\right)^2 = 2430,49 \text{ kgm}^2$$

3.4 Urychlující moment zátěže

1. vrstva (44)

$$M_{bzát} = J_{zát} \cdot \frac{\alpha_{motor}}{i} = 1600 \cdot \frac{15,265}{71} = 344 \text{ Nm}$$

2. vrstva (45)

$$M_{bzát} = J_{zát} \cdot \frac{\alpha_{motor}}{i} = 1857,61 \cdot \frac{15,13}{71} = 395,85 \text{ Nm}$$

3. vrstva (46)

$$M_{bzát} = J_{zát} \cdot \frac{\alpha_{motor}}{i} = 2134,44 \cdot \frac{15,06}{71} = 452,74 \text{ Nm}$$

4. vrstva (47)

$$M_{bzát} = J_{zát} \cdot \frac{\alpha_{motor}}{i} = 2430,49 \cdot \frac{14,97}{71} = 512,45 \text{ Nm}$$

Podmínky pro rozběh a brzdění:

- 1) Moment motoru při urychlování je roven momentu motoru při zpomalování,

$$M_{bmotor} = M_{vmotor}$$

- 2) Moment zátěže při urychlování je roven momentu zátěže při zpomalování,

$$M_{bzát} = M_{vzát}$$

3.5 Zdvih, moment motoru při urychlování

1. vrstva (48)

$$\begin{aligned} M_{motor} &= M_{bmotor} + (M_{bzát} + M_p) \cdot \frac{1}{i \cdot \eta} = \\ &= 45,33 + (344 + 40760,55) \cdot \frac{1}{71 \cdot 0,9} = 661,89 \text{ Nm} \end{aligned}$$

2. vrstva (49)

$$\begin{aligned} M_{motor} &= M_{bmotor} + (M_{bzát} + M_p) \cdot \frac{1}{i \cdot \eta} = \\ &= 44,93 + (395,85 + 43801,65) \cdot \frac{1}{71 \cdot 0,9} = 707,89 \text{ Nm} \end{aligned}$$

3. vrstva (50)

$$\begin{aligned} M_{motor} &= M_{bmotor} + (M_{bzát} + M_p) \cdot \frac{1}{i \cdot \eta} = \\ &= 44,72 + (452,74 + 46842,75) \cdot \frac{1}{71 \cdot 0,9} = 754,15 \text{ Nm} \end{aligned}$$

4. vrstva (51)

$$\begin{aligned} M_{motor} &= M_{bmotor} + (M_{bzát} + M_p) \cdot \frac{1}{i \cdot \eta} = \\ &= 44,46 + (512,45 + 49883,85) \cdot \frac{1}{71 \cdot 0,9} = 800,4 \text{ Nm} \end{aligned}$$

3.6 Zdvih, moment motoru při zpomalování

1. vrstva (52)

$$\begin{aligned} M_{motor} &= -M_{vmotor} + (-M_{vzát} + M_p) \cdot \frac{1}{i \cdot \eta} = \\ &= -45,33 + (-344 + 40760,55) \cdot \frac{1}{71 \cdot 0,9} = 560,91 \text{ Nm} \end{aligned}$$

2. vrstva (53)

$$\begin{aligned} M_{motor} &= -M_{vmotor} + (-M_{vzát} + M_p) \cdot \frac{1}{i \cdot \eta} = \\ &= -44,93 + (-395,85 + 43801,65) \cdot \frac{1}{71 \cdot 0,9} = 606,15 \text{ Nm} \end{aligned}$$

3. vrstva (54)

$$\begin{aligned} M_{motor} &= -M_{vmotor} + (-M_{vzát} + M_p) \cdot \frac{1}{i \cdot \eta} = \\ &= -44,72 + (-452,74 + 46842,75) \cdot \frac{1}{71 \cdot 0,9} = 651,13 \text{ Nm} \end{aligned}$$

4. vrstva (55)

$$\begin{aligned} M_{motor} &= -M_{vmotor} + (-M_{vzát} + M_p) \cdot \frac{1}{i \cdot \eta} = \\ &= -44,46 + (-512,45 + 49883,85) \cdot \frac{1}{71 \cdot 0,9} = 696,11 \text{ Nm} \end{aligned}$$

3.7 Spouštění, moment motoru při urychlování

1. vrstva (56)

$$\begin{aligned} M_{motor} &= -M_{bmotor} + (-M_{bzát} + M_p) \cdot \frac{\eta}{i} = \\ &= -45,33 + (-344 + 40760,55) \cdot \frac{0,9}{71} = 439,66 \text{ Nm} \end{aligned}$$

2. vrstva (57)

$$\begin{aligned} M_{motor} &= -M_{bmotor} + (-M_{bzát} + M_p) \cdot \frac{\eta}{i} = \\ &= -44,93 + (-395,85 + 43801,65) \cdot \frac{0,9}{71} = 475,93 \text{ Nm} \end{aligned}$$

3. vrstva (58)

$$\begin{aligned} M_{motor} &= -M_{bmotor} + (-M_{bzát} + M_p) \cdot \frac{\eta}{i} = \\ &= -44,72 + (-452,74 + 46842,75) \cdot \frac{0,9}{71} = 511,96 \text{ Nm} \end{aligned}$$

4. vrstva (59)

$$\begin{aligned} M_{motor} &= -M_{bmotor} + (-M_{bzát} + M_p) \cdot \frac{\eta}{i} = \\ &= -44,46 + (-512,45 + 49883,85) \cdot \frac{0,9}{71} = 547,99 \text{ Nm} \end{aligned}$$

3.8 Spouštění, moment motoru při zpomalování

1. vrstva (60)

$$\begin{aligned} M_{motor} &= M_{vmotor} + (M_{vzát} + M_p) \cdot \frac{\eta}{i} = \\ &= 45,33 + (344 + 40760,55) \cdot \frac{0,9}{71} = 538,58 \text{ Nm} \end{aligned}$$

2. vrstva (61)

$$\begin{aligned} M_{motor} &= M_{vmotor} + (M_{vzát} + M_p) \cdot \frac{\eta}{i} = \\ &= 44,93 + (395,85 + 43801,65) \cdot \frac{0,9}{71} = 575,3 \text{ Nm} \end{aligned}$$

3. vrstva

(62)

$$M_{motor} = M_{vmotor} + (M_{vzat} + M_p) \cdot \frac{\eta}{i} =$$

$$= 44,72 + (452,74 + 46842,75) \cdot \frac{0,9}{71} = 612,26 \text{ Nm}$$

4. vrstva

(63)

$$M_{motor} = M_{vmotor} + (M_{vzat} + M_p) \cdot \frac{\eta}{i} =$$

$$= 44,46 + (512,45 + 49883,85) \cdot \frac{0,9}{71} = 649,21 \text{ Nm}$$

Vybraný elektromotor typ 1LG4 313-8AB60-H57 splňuje ve všech bodech požadované parametry. Při výpočtu parametrů motoru vyšly minimální požadované hodnoty $P_m = 56,6 \text{ kW}$, $M_m = 780,65 \text{ Nm}$, $n_m = 728,9 \text{ ot.min}$. Z katalogové řady elektromotorů Siemens byl vybrán motor s nejbližším vyšším výkonem v dané typové řadě se jmenovitými hodnotami $P_n = 75 \text{ kW}$, $M_n = 971 \text{ Nm}$, $n_n = 738 \text{ ot.min}^{-1}$.

Následným přesným výpočtem s daným motorem a zadanou zátěží, se hodnoty pohybovaly v bezpečných mezích, pod jmenovitými hodnotami navrženého elektromotoru. V úvahu byly brány hodnoty pro nejnejpříznivější případ provozu vrátku a to ve čtvrté vrstvě lana, kde dochází k největšímu zatěžování pohonu.

Z bezpečnostních důvodů jsou parametry motoru částečně předimenzovány a to s ohledem na skutečnost, že daný motor má vlastní chlazení a v případě dlouhodobějšího chodu v nízkých otáčkách by mohlo docházet k nadměrnému oteplování. Tato skutečnost by měla nepříznivý vliv jak na izolaci vinutí elektromotoru, tak na jeho bezpečný a spolehlivý chod.

V neposlední řadě se touto dimenzí taktéž dostáváme na stranu bezpečnosti při rozhoupání, nebo nečekaném zhrounutí břemene.

4. Stanovení maximálního brzděného výkonu

K maximálnímu výkonu motoru v generátorickém režimu dochází na počátku brzdění při maximálních otáčkách. Čas rozběhové rampy t_b je stanoven na hodnotu 5s. Čas brzdě rampy t_v je stanoven na hodnotu 5s.

1. vrstva

(64)

$$P_{brmotor \max} = \frac{M_{motorv} \cdot n_{motor \max}}{9550} = -\frac{538,58 \cdot 728,9}{9550} = -41,1 \text{ kW}$$

2. vrstva (65)

$$P_{brmotor\ max} = \frac{M_{motorv} \cdot n_{motor\ max}}{9550} = -\frac{575,3 \cdot 723,63}{9550} = -43,59\ kW$$

3. vrstva (66)

$$P_{brmotor\ max} = \frac{M_{motorv} \cdot n_{motor\ max}}{9550} = -\frac{612,26 \cdot 719,29}{9550} = -46,11\ kW$$

4. vrstva (67)

$$P_{brmotor\ max} = \frac{M_{motorv} \cdot n_{motor\ max}}{9550} = -\frac{649,21 \cdot 715,27}{9550} = -48,62\ kW$$

5. Dimenzování měniče kmitočtu

Frekvenční měnič bude zvolen pro maximální vypočtený moment elektromotoru. Dimenze bude provedena dle vypočteného proudu. Při výpočtu budou použity početní vztahy a hodnoty doporučené výrobcem frekvenčního měniče a vybraného elektromotoru dle [10].

5.1 Výpočet maximálního proudu zvoleného elektromotoru

$$I_{motormax} \Rightarrow \sqrt{\left(\frac{M_{motormax}}{M_{motorn}}\right)^2 \cdot (I_{motorn}^2 - I_{\mu n}^2) + I_{\mu n}^2} \quad (68)$$

$$I_{\mu n} = 0,41 \cdot I_{motorn} = 0,41 \cdot 140 = 57,4\ A \quad (69)$$

$$\begin{aligned} I_{motormax} &\Rightarrow \sqrt{\left(\frac{800,4}{971}\right)^2 \cdot (140^2 - 57,4^2) + 57,4^2} = \\ &= \sqrt{0,67 \cdot 16305,24 + 3294,76} = 119,2\ A \end{aligned} \quad (70)$$

Při vlastním výběru typové velikosti měniče je nutné postupovat dle technických parametrů a pokynů jeho výrobce uváděných v technické dokumentaci k dané typové řadě měničů.

Pro návrh pohonu vrátku 10t byl zvolen frekvenční měnič ALTIVAR 71. Frekvenční měnič ALTIVAR 71 je určen pro regulaci otáček a momentu třífázových asynchronních a synchronních motorů se zpětnou vazbou nebo bez ní. V našem případě bude použita zpětná vazba přes IRC čidlo. Z hlediska napětí lze tento měnič připojit k sítím 230, 400, 500 a 690 V. Měnič je standardně vybaven grafickým terminálem LCD. Parametry, provozní a poruchové stavy pohonu jsou zobrazovány v podobě textu nebo grafu. U velmi složitých pohonářských úloh se může stát, že přístup k parametrům pomocí standardně zabudovaného terminálu je komplikovaný. Proto je měnič slučitelný se softwarovým prostředím PowerSuite. Obsluha tímto systémem dostává do ruky nástroj pro konfiguraci prostřednictvím PC.

Altivar 71 má už v základní verzi k dispozici asi 150 aplikačně zaměřených funkcí, které jsou často používané. Jako příklad můžeme uvést implementaci v jeřábových a zdvihových aplikacích. Pro speciální aplikace lze měnič rozšířit řadou volitelných karet.



Obr. 4 Frekvenční měnič ALTIVAR 71

Výběr měniče a určení typové velikosti závisí na:

- 1) Parametrech napájecí sítě v místě připojení frekvenčního měniče.

Jeřáb HM 1000 je určen k provozu na síti 3PEN AC 50 Hz 400 V/TN-C

- 2) Charakteru a závislosti momentu zátěže.

Zatěžovací moment zdvihu je potenciální. Vzhledem k dynamickým změnám zatížení byl frekvenční měnič vybrán na základě jmenovitého proudu použitého elektromotoru.

- 3) Druh a velikost motoru, jeho parametry.

Byl zvolen třífázový elektromotor s kotvou nakrátko typu 1LG4 313-8AB60-H57 výrobce SIEMENS.

4) Pracovnímu prostředí měniče

Měnič pro vrátek bude pracovat ve venkovním prostředí, ovšem bude umístěn v klimatizovaném uzavřeném rozvaděči se stálou teplotou a chráněn před venkovními vnějšími vlivy.

5) Pracovnímu režimu měniče

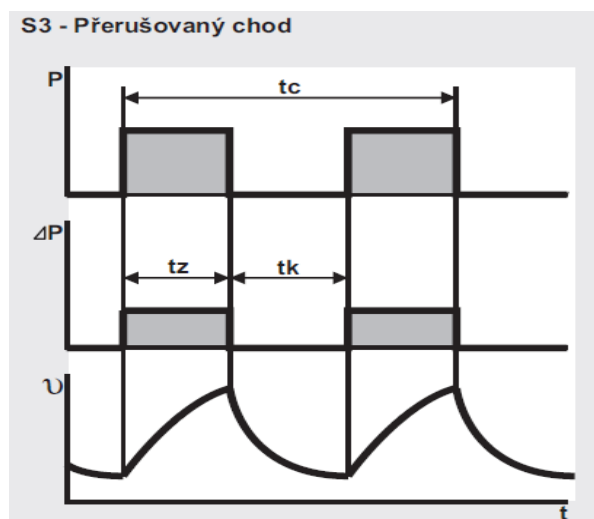
Druh řízení (U/f, vektorové atd.), spínací frekvenci apod.

V našem případě se jedná o návrh a výběr typu a velikosti frekvenčního měniče pro pohon s přerušovaným chodem definovaným jako S3 tj. s rozběhy, brzděním, motorickým a generátorickým ustáleným chodem. Druh zatížení označované S3 je v souladu s ČSN EN 60034-1 definováno jako přerušované zatížení. Jedná se o sled stejných pracovních cyklů, z nichž každý zahrnuje dobu provozu t_z při konstantním zatížení a dobu klidu a odpojení t_k .

Po dobu zatížení nedosáhne elektromotor ustáleného oteplení. Během doby klidu se elektromotor nestací ochladit na teplotu okolí. Teplota, respektive oteplení elektromotoru kolísá mezi maximální a minimální hodnotou. Rozběhový proud podstatně neovlivňuje oteplení. V katalogu je uveden přerušovaný chod s dobou cyklu 10 minut a zatěžovateli 25%, 40%, 60%, 100%. Zatěžovatel je definován jako poměr doby zatížení k době pracovního cyklu vyjádřený v procentech.

$$z = \frac{t_z}{t_c} \cdot 100[\%] \quad (71)$$

Výchozím podkladem k správnému návrhu a dimenzování měniče je stejně jako v případě dimenzování motoru časový zatěžovací momentový (proudový) diagram pracovního cyklu.



Obr. 5 Zatěžovací diagram pro S3 přerušovaný chod

Frekvenční měnič bude vybrán dle uvedené tabulky výrobce.

Three-phase supply voltage: 380...480 V 50/60 Hz

Three-phase motor 380...480 V

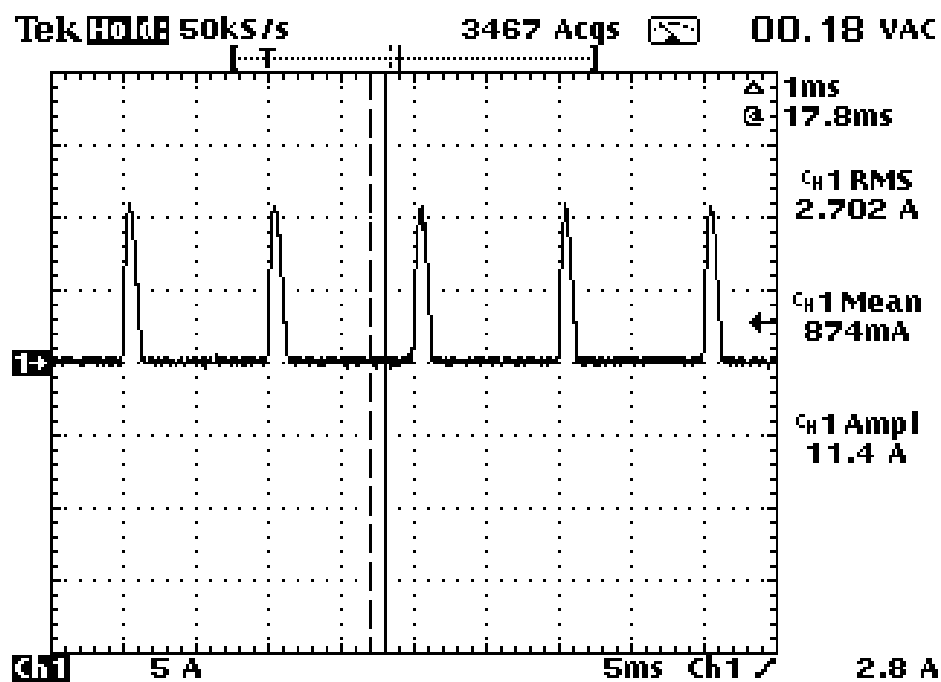
Motor		Line supply (input)					Drive (output)			Altivar 71
Power indicated on plate (1)		Max. line current (2)		Max. prospective line Isc	Apparent power	Max. inrush current (3)	Max. available nominal current In (1)	Max. transient current (1) for		Catalog number (4)(5)(6)
		at 380 V	at 480 V					60 s	2 s	
kW	HP	A	A	kA	kVA	A	A	A	A	
0.75	1	3.7	3	5	2.4	19.2	2.3	3.5	3.8	ATV71H075N4
1.5	2	5.8	5.3	5	4.1	19.2	4.1	6.2	6.8	ATV71HU15N4
2.2	3	8.2	7.1	5	5.6	19.2	5.8	8.7	9.6	ATV71HU22N4
3	-	10.7	9	5	7.2	19.2	7.8	11.7	12.9	ATV71HU30N4
4	5	14.1	11.5	5	9.4	19.2	10.5	15.8	17.3	ATV71HU40N4
5.5	7.5	20.3	17	22	13.7	46.7	14.3	21.5	23.6	ATV71HU55N4
7.5	10	27	22.2	22	18.1	46.7	17.6	26.4	29	ATV71HU75N4
11	15	36.6	30	22	24.5	93.4	27.7	41.6	45.7	ATV71HD11N4
15	20	48	39	22	32	93.4	33	49.5	54.5	ATV71HD15N4
18.5	25	45.5	37.5	22	30.5	93.4	41	61.5	67.7	ATV71HD18N4
22	30	50	42	22	33	75	48	72	79.2	ATV71HD22N4
30	40	66	56	22	44.7	90	66	99	109	ATV71HD30N4
37	50	84	69	22	55.7	90	79	118.5	130	ATV71HD37N4
45	60	104	85	22	62.7	200	94	141	155	ATV71HD45N4
55	75	120	101	22	81.8	200	116	174	191	ATV71HD55N4
75	100	167	137	22	110	200	160	240	264	ATV71HD75N4

Tab. 1 Výběr frekvenčního měniče

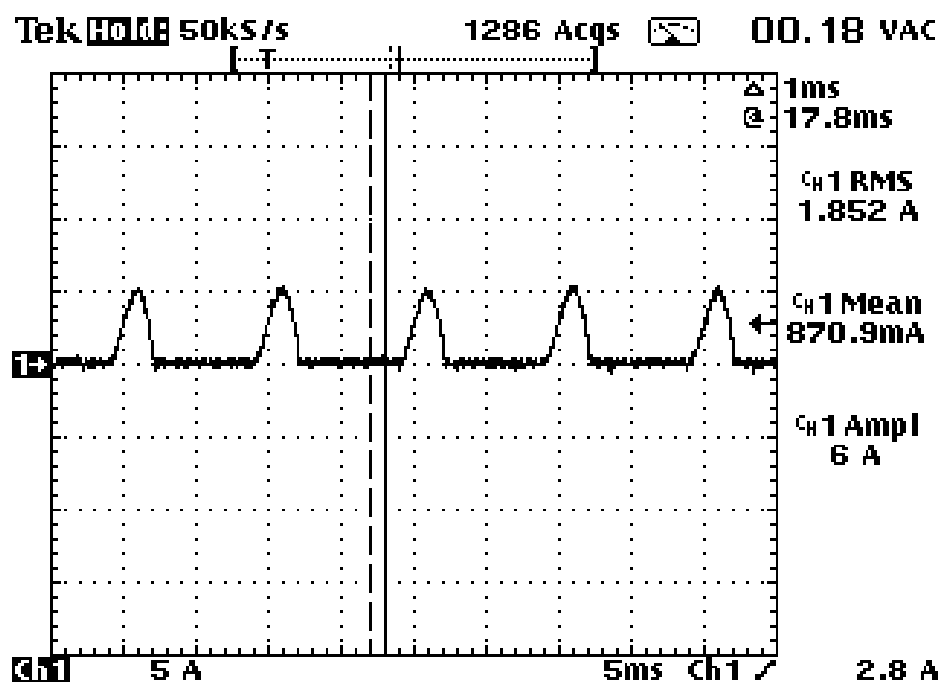
Na základě vypočtených parametrů a jmenovitých hodnot použitého elektromotoru byl zvolen dle přiřazovací tabulky frekvenční měnič ALTIVAR 71 typ ATV71HD75N4.

5.2 Frekvenční měnič a harmonické zkreslení

Součástí frekvenčního měniče je diodový usměrňovač s filtračním kondenzátorem na výstupu. Usměrňovač odebírá při chodu ze sítě nesinusový proud, který vzniká v důsledku nabíjení kondenzátoru. Proud totiž obvodem protéká jen tehdy, je-li napětí sítě vyšší, než napětí na kondenzátoru. Výsledkem je generování lichých harmonických z měniče do napájecí soustavy. Zkreslení proudu vyššími harmonickými (THD) dosahuje až 140%. Jedná se převážně o liché harmonické řádu 5., 7., 11., 13. Pokud použijeme při napájení měniče síťovou tlumivku dojde k filtraci proudu a snížení zkreslení THD na hodnotu přibližně 40%, přičemž efektivní hodnota síťového proudu poklesne až o 35%.



Obr. 6 Vstupní napájecí proud FM bez tlumivky



Obr. 7 Vstupní napájecí proud FM s použitím síťové tlumivky

Další kladnou vlastností síťové tlumivky je omezení vlivu krátkých napěťových špiček na frekvenční měnič. Tato vlastnost chrání měnič před poškozením vlivem vysokonapěťových špiček z napájecí sítě.

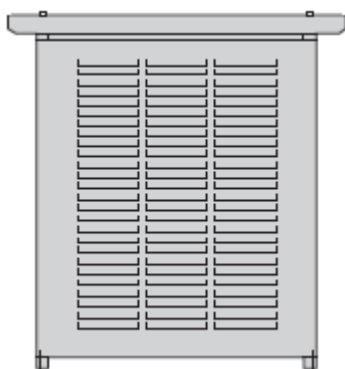
Motorové tlumivky se zapojují na výstup frekvenčního měniče v případě větších délek kabelů mezi měničem a motorem. Potlačují negativní vliv kapacitní zátěže, kterou kabely při větších délkách pro měniče představují. Kapacitní složka impedance kabelu, vztažená ke spínací frekvenci výkonových tranzistorů měniče, může způsobit, že je výstup měniče přetěžován, aniž dodává do zátěže jmenovitý proud. Kromě potlačení tohoto jevu se současně omezí vyzařování rušivých napětí jak na výstupu měniče, tak i směrem do napájecí sítě.

Následující funkcí tlumivky je omezení přepětí na vinutí motoru, menší stárnutí izolace motoru a snížení tepelných ztrát motoru.

Výrobce frekvenčního měniče ALTIVAR 71 předepisuje přesný typ síťové a motorové tlumivky v závislosti na výkonu měniče a výkonu napájeného elektromotoru. Pro aplikaci námi řešeného vrátku byla vybrána síťová tlumivka VW3 A4558 a motorová tlumivka VW3 A5104, které jsou výrobcem pro tuto konfiguraci předepsány.

6. Volba brzdného rezistoru

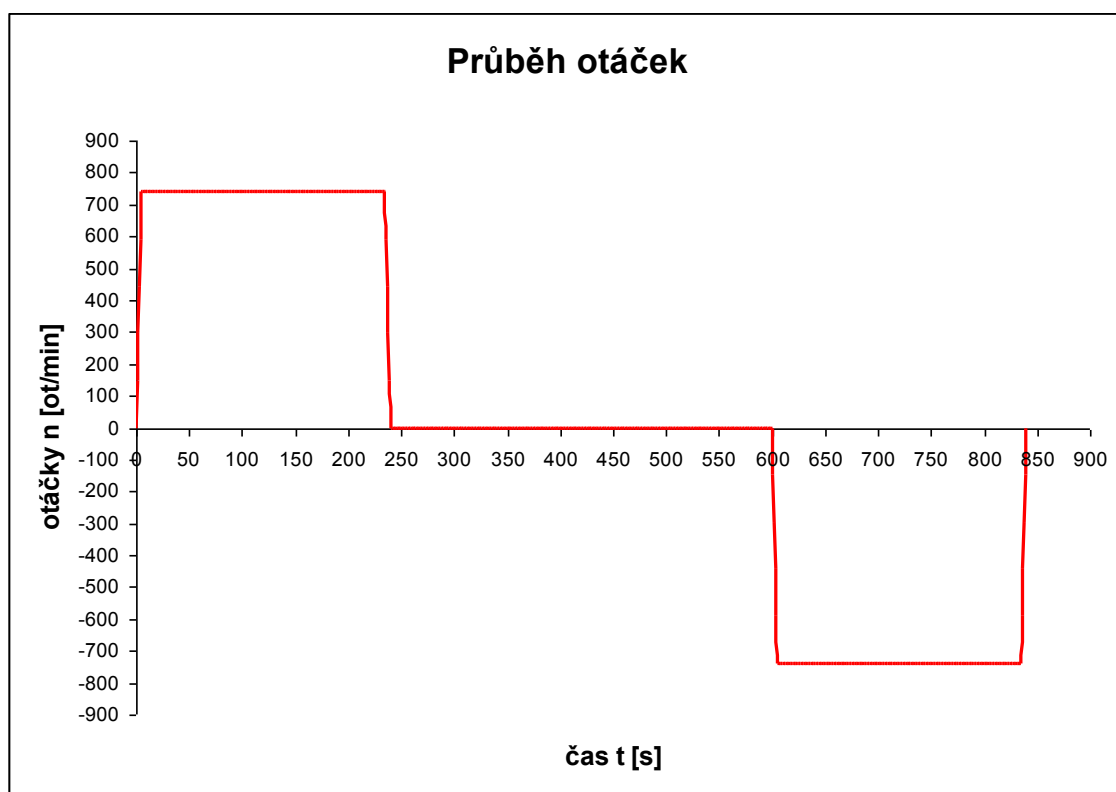
Brzdné rezistory jsou zařízení, které slouží k maření energie vracené při generátorickém brzdění střídavých pohonů. Při požadavku na snížení otáček motoru, nebo v případě přetáčení zátěže (setrvačnost zátěže působí proti brzdnému momentu) vyvíjí frekvenční měnič brzdný moment. V okamžiku, kdy motor vytváří brzdný moment, pracuje jako generátor indukující napětí. To znamená, že motor přijímá energii od zátěže a vrací ji jako elektrickou energii zpět do svého napájecího zdroje. Pokud měnič přijímá energii generovanou motorem, tato energie se jeví jako proud stejnosměrného meziobvodu s opačným znaménkem. Jelikož standardní vstupní usměrňovač měniče, není schopen pracovat s proudem opačného toku, nabíjí tento proud kondenzátory stejnosměrného meziobvodu. Tento nabíjecí proud způsobuje zvyšování napětí ve stejnosměrném meziobvodu, z tohoto důvodu jsou frekvenční měniče vybaveny měřením napětí ve stejnosměrném meziobvodu a ochranou proti přepětí.



Obr. 8 Brzdný rezistor v krytí IP23 pro montáž do venkovního prostředí

Hodnoty pro manipulaci s materiálem při zadaném zatěživateli 40% a dobou pracovního cyklu 10 minut.

- čas rozběhu $t_b = 5s$
- čas brzdění $t_v = 5s$
- doba zdvihu a spouštění $t_k = 230s$
- doba klidu $t_p = 360s$



Obr. 9 Průběh otáček motoru v pracovním cyklu zdvih – pauza – spouštění

6.1 Maximální brzdňý výkon při zpomalování

1. vrstva

(72)

$$P_{brW \max v} = P_{brmotor \max} \cdot \eta_{motor} = 41,1 \cdot 0,9 = 36,99 \text{ kW}$$

2. vrstva (73)

$$P_{brW \max v} = P_{brmotor \max} \cdot \eta_{motor} = 43,59 \cdot 0,9 = 39,23 \text{ kW}$$

3. vrstva (74)

$$P_{brW \max v} = P_{brmotor \max} \cdot \eta_{motor} = 46,11 \cdot 0,9 = 41,49 \text{ kW}$$

4. vrstva (75)

$$P_{brW \max v} = P_{brmotor \max} \cdot \eta_{motor} = 48,62 \cdot 0,9 = 43,75 \text{ kW}$$

6.2 Maximální brzdňý výkon při zrychlování

1. vrstva (76)

$$P_{brW \max b} = \frac{M_{motorb} \cdot n_{motor \max}}{9550} = \frac{439,66 \cdot 728,9}{9550} = 33,55 \text{ kW}$$

2. vrstva (77)

$$P_{brW \max b} = \frac{M_{motorb} \cdot n_{motor \max}}{9550} = \frac{475,93 \cdot 723,63}{9550} = 36,06 \text{ kW}$$

3. vrstva (78)

$$P_{brW \max b} = \frac{M_{motorb} \cdot n_{motor \max}}{9550} = \frac{511,96 \cdot 719,29}{9550} = 38,55 \text{ kW}$$

4. vrstva (79)

$$P_{brW \max b} = \frac{M_{motorb} \cdot n_{motor \max}}{9550} = \frac{547,99 \cdot 715,27}{9550} = 41,04 \text{ kW}$$

6.3 Brzdňý výkon při konstantní rychlosti

1. vrstva (80)

$$P_{brWkonst} = P_{mkonst} \cdot \eta_{motor} = 37,96 \cdot 0,9 = 34,16 kW$$

2. vrstva (81)

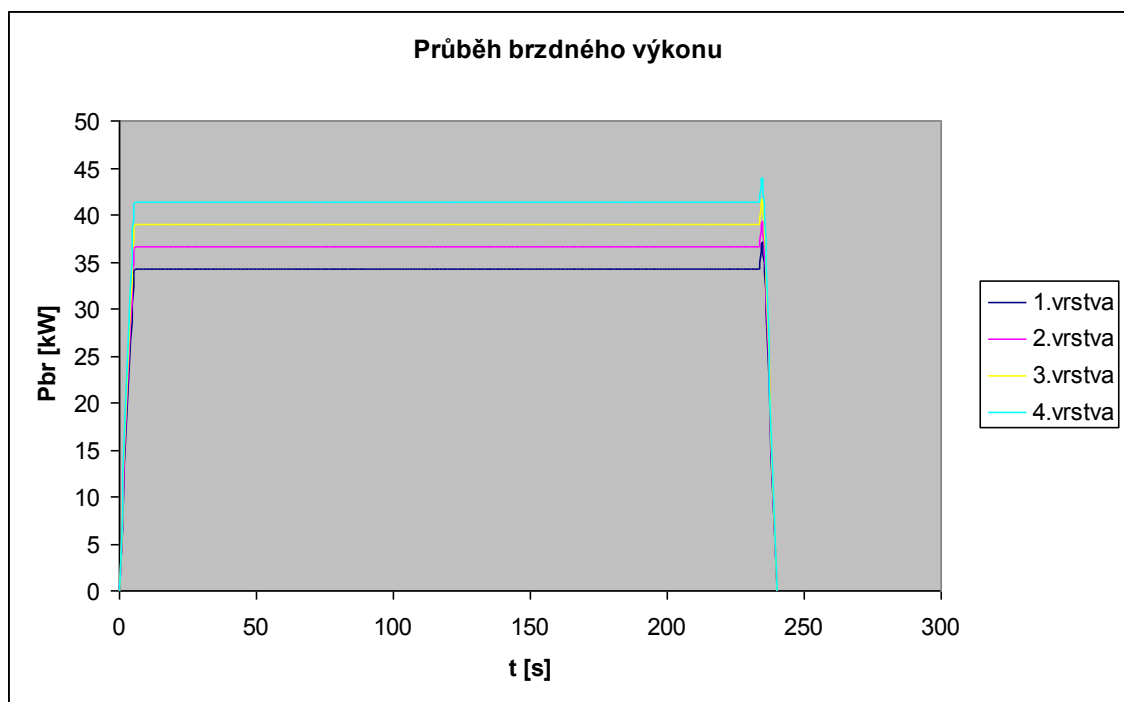
$$P_{brWkonst} = P_{mkonst} \cdot \eta_{motor} = 40,61 \cdot 0,9 = 36,54 kW$$

3. vrstva (82)

$$P_{brWkonst} = P_{mkonst} \cdot \eta_{motor} = 43,26 \cdot 0,9 = 38,93 kW$$

4. vrstva (83)

$$P_{brWkonst} = P_{mkonst} \cdot \eta_{motor} = 45,91 \cdot 0,9 = 41,31 kW$$



Obr. 10 Průběh brzdňého výkonu při spouštění břemene

Na základě vypočtených hodnot brzdného výkonu bude přiřazen brzdňý rezistor k frekvenčnímu měniči dle výrobce, který uvádí v katalogu měniče tabulky minimálních ohmických hodnot a výkonů rezistorů dle aplikace a velikosti napájecího napětí.

Minimum ohmic value of the resistors to be associated with the Altivar 71 drive, at 20°C (2)											
ATV 71H●●●M3, ATV 71H●●●M3X, ATV 71H●●●N4 and ATV 71H●●●Y drives											
Type of drive	ATV 71H	037M3, 075M3	U15M3	U22M3, U30M3	U40M3	U55M3	U75M3				
Minimum value	Ω	44	33	22	16	11	8				
Type of drive	ATV 71H	D11M3X, D15M3X	D18M3X	D22M3X, D30M3X	D37M3X...	D75M3X					
Minimum value	Ω	3	4	3.3	1.7	1.3					
Type of drive	ATV 71H	075N4... U22N4	U30N4, U40N4	U55N4	U75N4	D11N4	D15N4, D18N4	D22N4, D30N4	D37N4	D45N4, D55N4	D75N4
Minimum value	Ω	56	34	23	19	12	7	13.3	6.7	5	3.3
Type of drive	ATV 71H	D90N4	C11N4... C16N4	C20N4... C28N4	C31N4... C50N4						
Minimum value	Ω	2.5	1.9	1.05	0.7						
Type of drive	ATV 71H	U22Y... D37Y	D45Y, D55Y	D75Y, D90Y	C11Y... C16Y	C20Y... C31Y	C40Y... C63Y				
Minimum value	Ω	12	8	5	4	2	1				
ATV 71W●●●N4 drives											
Type of drive	ATV 71W	075N4... U22N4	U30N4, U40N4	U55N4	U75N4	D11N4	D15N4, D18N4	D22N4, D30N4	D37N4	D45N4, D55N4	D75N4
Minimum value	Ω	56	34	23	19	12	7	13.3	6.7	5	3.3
ATV 71P●●●N4Z drives											
Type of drive	ATV 71P	075N4Z... U22N4Z	U30N4Z... U40N4Z	U55N4Z	U75N4Z	D11N4Z					
Minimum value	Ω	56	34	23	19	12					

Tab. 2 Tabulka minimálních ohmických hodnot rezistorů pro zdvihové aplikace

Dle výše uvedené tabulky byla odečtena minimální ohmická hodnota brzdného rezistoru pro frekvenční měnič typu ATV71HD75N4. Tato hodnota činí 3,3 Ω.

Maximální brzdňý výkon při spouštění břemene vzhledem k výkonu zdvihového motoru a účinnosti převodovky byl vypočten na hodnotu 48,62 kW. Při výběru brzdného rezistoru musíme dodržet podmínku minimální ohmické hodnoty a ztrátového výkonu rezistoru, jehož hodnota musí být větší než vypočtený maximální výkon.

Hoist resistors					
For drives	Ohmic value at 20°C	Average power available at 50°C (1)	Quantity per drive	Reference	Weight
	Ω	kW			kg
Supply voltage: 200...240 V 50/60 Hz					
ATV 71H037M3, H075M3	100	1.6	1	VW3 A7 801	6.000
ATV 71HU15M3	60	5.6	1	VW3 A7 802	21.000
ATV 71HU22M3...HU40M3	24.5	9.8	1	VW3 A7 803	28.000
ATV 71HU55M3, HU75M3	14	22.4	1	VW3 A7 804	54.000
ATV 71HD11M3X, HD15M3X	8.1	44	1	VW3 A7 805	92.000
ATV 71HD18M3X	4.2	62	1	VW3 A7 806	126.000
ATV 71HD22M3X, HD30M3X	3.5	19.5	1	VW3 A7 807	51.000
ATV 71HD37M3X, HD45M3X	1.85	27.4	1	VW3 A7 808	94.000
ATV 71HD55M3X	1.8	30.6	1	VW3 A7 809	103.000
ATV 71HD75M3X	1.4	44	1	VW3 A7 810	119.000
Supply voltage: 380...480 V 50/60 Hz					
ATV 71H075N4... HU22N4ATV 71W075N4... WU22N4ATV 71P075N4Z...PU22N4Z	100	1.6	1	VW3 A7 801	6.000
ATV 71HU30N4... HU55N4ATV 71WU30N4... WU55N4ATV 71PU30N4Z...PU55N4Z	60	5.6	1	VW3 A7 802	21.000
ATV 71HU75N4, HD11N4ATV 71WU75N4, WD11N4ATV 71PD11N4Z	24.5	9.8	1	VW3 A7 803	28.000
ATV 71HD15N4... HD30N4ATV 71WD15N4...WD30N4	14	22.4	1	VW3 A7 804	54.000
ATV 71HD37N4... HD55N4ATV 71W37N4...WD55N4	8.1	44	1	VW3 A7 805	92.000
ATV 71HD75N4 ATV 71WD75N4	4.2	62	1	VW3 A7 806	126.000
ATV 71HD90N4	2.75	56	1	VW3 A7 811	130.000
ATV 71HC11N4, HC13N4	2.1	75	1	VW3 A7 812	181.000
ATV 71HC16N4	2.1	112	1	VW3 A7 813	250.000
ATV 71HC20N4	1.05	112	1	VW3 A7 814	280.000
ATV 71HC25N4, HC28N4	1.05	150	1	VW3 A7 815	362.000
ATV 71HC31N4, HC40N4	0.7	225	1	VW3 A7 816	543.000
ATV 71HC50N4	0.7	330	1	VW3 A7 817	642.000

Tab. 3 Tabulka pro konfiguraci brzděného rezistoru dle brzděného výkonu

Vzhledem k napájecímu napětí zdvihového vrátku 400V AC a vypočtenému maximálnímu brzděnému výkonu 48,62 kW byl zvolen brzděný rezistor typ VW3 A7 806, který koresponduje s použitým frekvenčním měničem ATV71HD75N4. Jmenovitá ohmická hodnota 4,2 Ω je větší než požadovaná minimální hodnota 3,3 Ω. Jmenovitý ztrátový výkon brzděného rezistoru o hodnotě 62 kW je větší než námi vypočtený brzděný výkon 48,62 kW.

Obě podmínky byly tedy splněny a vybraný brzděný rezistor vyhovuje ve všech bodech zdvihové aplikaci.

6.4 Výpočet brzdné energie během jednoho cyklu

Hodnota energie bude počítána dle vztahu: (84)

$$W_{br} = \frac{1}{2} \cdot P_{brW_{\max b}} \cdot t_b + P_{brW_{\text{konst}}} \cdot t_k + \frac{1}{2} \cdot P_{brW_{\max v}} \cdot t_v$$

1. vrstva (85)

$$W_{br} = \frac{1}{2} \cdot 33,55 \cdot 5 + 34,16 \cdot 230 + \frac{1}{2} \cdot 36,99 \cdot 5 = 8033,14 \text{ kWs}$$

2. vrstva (86)

$$W_{br} = \frac{1}{2} \cdot 36,06 \cdot 5 + 36,54 \cdot 230 + \frac{1}{2} \cdot 39,23 \cdot 5 = 8592,42 \text{ kWs}$$

3. vrstva (87)

$$W_{br} = \frac{1}{2} \cdot 38,55 \cdot 5 + 38,93 \cdot 230 + \frac{1}{2} \cdot 41,49 \cdot 5 = 9153,99 \text{ kWs}$$

4. vrstva (88)

$$W_{br} = \frac{1}{2} \cdot 41,04 \cdot 5 + 41,31 \cdot 230 + \frac{1}{2} \cdot 43,75 \cdot 5 = 9713,27 \text{ kWs}$$

Vypočtená hodnota brzdné energie odpovídá energii dle grafu znázorňující brzdný výkon.

V předešlých kapitolách 2, 3, 4, 5, 6 byly použity hodnoty, početní vztahy a postupy dle dokumentace [10]

7. Kontrola oteplení elektromotoru

Elektrický asynchronní motor jako tepelný systém je velmi složitý obvod. V různých jeho částech (vinutí statoru, vinutí rotoru, železo magnetického obvodu, mechanické tření) vznikají energetické ztráty, tyto ztráty oteplují místa svého vzniku a přecházejí do částí stroje s nižším oteplením a také do chladicího média. Analyzovat tyto tepelné toky uvnitř stroje můžeme jen v laboratorních podmínkách, projektant pohonu může vycházet jen z přibližných vztahů mezi funkčními veličinami (proudy, točivý moment) a ztrátami nebo oteplením.

Takovými veličinami, které postačují projektantovi při dimenzování motoru (s ohledem na jeho životnost) jsou efektivní hodnoty proudu, momentu nebo výkonu. Pro asynchronní motor – přísně vzato – není žádný z těchto efektivních parametrů úplně korektní. Tak např. efektivní proud: Je to proud statoru nebo rotoru? I po přepočtu na statorovou stranu je proud rotoru jiný než proud statoru, neboť ten obsahuje magnetizační složku. A kde je oteplení od ostatních ztrát? Nebo efektivní moment: Moment je úměrný ne celému proudu statoru, ale pouze jeho momentové složce. Není zde tedy přímý vztah mezi momentem a proudem statoru.

Nebo efektivní výkon: Ztráty ve stroji nejsou přímo úměrné čtverci výkonu, neboť výkon se mění spolu s točivým momentem a spolu s otáčivou rychlostí.

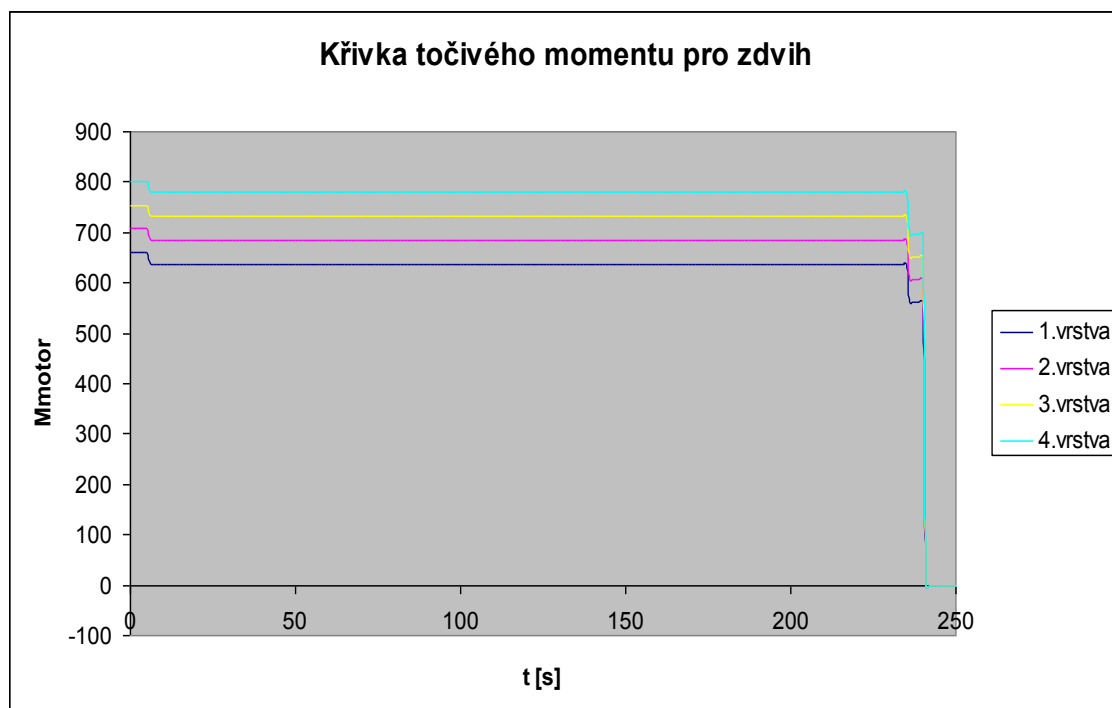
Žádná z uvedených tří veličin není sama o sobě zcela korektním měřítkem pro celkové ztráty ve stroji, není ani funkce (např. kvadrátu) některé z těchto veličin přesným ukazatelem o oteplení izolace. Může se proto při dimenzování motoru užít kterákoliv z uvedených veličin.

Za nejpraktičtější se pro asynchronní motory s frekvenčním řízením považuje metoda efektivního momentu M_{eff} . Je to zejména proto, že způsoby zatěžování pohonů různými typy strojů (zdvihací, trakční, pro dopravu kapalin a plynů apod.) jsou nejčastěji udávány jako požadovaný točivý moment a jeho časový průběh. Máme-li pohon zatěžován určitou dobu proměnným momentem, efektivní moment představuje takový průměrný moment, který způsobí za stejnou dobu stejné ztráty nebo oteplení. Efektivní moment je

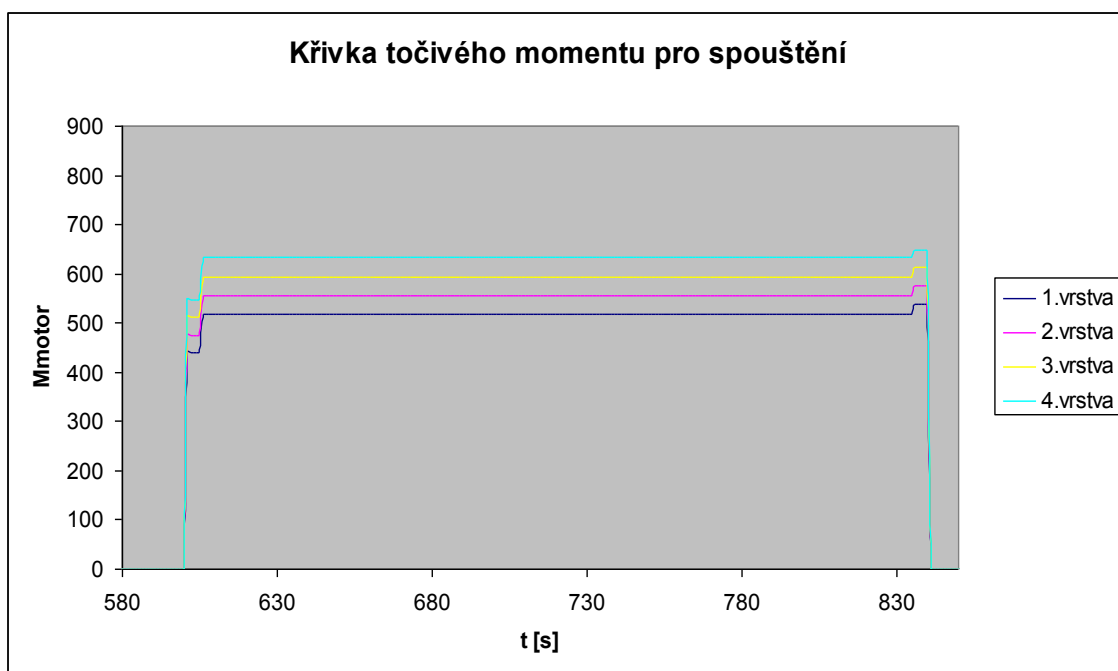
$$M_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_i M_i^2 \cdot t_i} \quad (89)$$

kde M_i je zatěžovací točivý moment v časovém úseku t_i , T je celková doba cyklu.

Při kontrole oteplení motoru metodou efektivního momentu se ve výpočtu následně objeví hodnota činitele 0,3. Jedná se o činitel zhoršeného ochlazování, který se uvádí v katalogové dokumentaci výrobce elektromotoru. Ve vzorci má funkci takovou, že zkrátí celkovou dobu, při které elektromotor stojí (pauza mezi cykly). Pro námi vybraný elektromotor typové řady 1LG4 uvádí výrobce SIEMENS pro tento činitel hodnotu 0,3, se kterou se provede následná kontrola elektromotoru na dovolené oteplení.



Obr. 11 Průběh momentu motoru při zdvihu



Obr. 12 Průběh momentu motoru při spouštění

Z křivky točivého momentu vypočteme efektivní moment pro jednotlivé vrstvy dle vzorce (89):

1. vrstva (90)

$$M_{eff} = \sqrt{\frac{661,89^2 \cdot 5 + 637,88^2 \cdot 230 + 560,91^2 \cdot 5 + 439,66^2 \cdot 5 + 516,68^2 \cdot 230 + 538,58^2 \cdot 5}{2 \cdot (5 + 230 + 5 + 0,3 \cdot 360)}}$$

$$= \sqrt{\frac{161165735,5}{696}} = 481,2 \text{ Nm}$$

2. vrstva (91)

$$M_{eff} = \sqrt{\frac{707,89^2 \cdot 5 + 685,47^2 \cdot 230 + 606,15^2 \cdot 5 + 475,93^2 \cdot 5 + 555,23^2 \cdot 230 + 575,3^2 \cdot 5}{2 \cdot (5 + 230 + 5 + 0,3 \cdot 360)}}$$

$$= \sqrt{\frac{186104406,6}{696}} = 517,09 \text{ Nm}$$

3. vrstva (92)

$$M_{eff} = \sqrt{\frac{754,15^2 \cdot 5 + 733,06^2 \cdot 230 + 651,13^2 \cdot 5 + 511,96^2 \cdot 5 + 593,78^2 \cdot 230 + 612,26^2 \cdot 5}{2 \cdot (5 + 230 + 5 + 0,3 \cdot 360)}}$$
$$= \sqrt{\frac{212837269,2}{696}} = 552,99 \text{ Nm}$$

4. vrstva (93)

$$M_{eff} = \sqrt{\frac{800,4^2 \cdot 5 + 780,65^2 \cdot 230 + 696,11^2 \cdot 5 + 547,99^2 \cdot 5 + 632,33^2 \cdot 230 + 649,21^2 \cdot 5}{2 \cdot (5 + 230 + 5 + 0,3 \cdot 360)}}$$
$$= \sqrt{\frac{241363679,6}{696}} = 588,88 \text{ Nm}$$

Vypočtený efektivní moment je v každé vrstvě menší než jmenovitý moment motoru. Touto kontrolou bylo potvrzeno, že vybraný elektromotor je vhodný pro zadanou aplikaci.

8. Výběr a návrh rozvaděče

Při výběru rozvaděčové skříně, bylo postupováno na základě:

- a) Prostředí, ve kterém bude rozvaděč instalován
- b) Vnitřního uspořádání přístrojů
- c) Rozměrů uvažovaného místa
- d) EMC
- e) Dostupnosti a ekonomické rozvahy

Dle těchto kritérií byla zvolena rozvaděčová skříň ze systému SAREL SPACIAL 6000 o rozměrech 1800 x 1000 x 600 mm. Jedná se o skříň, která je vyrobena z ocelového plechu síly 1,5 mm a krytím IP55.

Základ skříně tvoří 4 stojiny z trojúhelníkového taženého profilu. Tyto stojiny jsou přišroubovány na spodní a horní rám, který je svařovaný. Bočnice a zadní panel jsou vyrobeny z totožného materiálu. Těsnění na dveřích je z polyuretanu bez paměťového efektu, známé jako tzv. lité těsnění. Celý rozvaděč je povrchově upraven práškovou kompozicí epoxy/polyester v odstínu RAL 7032.



Obr. 13 Řada rozvaděčových skříní SAREL SPACIAL 6000

8.1 Kontrola oteplení rozvaděče dle IEC 890

Doprovodným jevem každého rozvaděče jsou tepelné ztráty. Jejich příčinou je ztrátový výkon proudových obvodů, vyvolaný průchodem elektrického proudu. Důsledkem je pak nárůst teploty jednotlivých elementů proudovodné dráhy. Teplotní rozdíl mezi proudovými obvody a vnitřním prostorem rozvaděče vyvolá přestup tepla a nárůst vnitřní teploty. Následným přestupem tepla mezi vnitřním prostorem rozvaděče a okolním prostředím se po určité době vytvoří tepelná rovnováha s ustáleným rozložením teploty. Cílem tepelného návrhu elektrického zařízení je dosáhnout takového rozložení teploty, při němž by nebyly za normálních provozních podmínek překročeny tepelné meze, stanovené pro jeho jednotlivé části.

Ověření správnosti návrhu lze provést experimentálně typovou oteplovací zkouškou rozvaděče. Protože typová oteplovací zkouška může být v některých případech těžko proveditelná či ekonomicky neúnosná, lze v souladu s ČSN provést výpočet na základě matematické extrapolace údajů, zjištěných při zkouškách jiných rozvaděčů. Přesný postup je uveden v IEC 890 – Metoda stanovení oteplení extrapolací pro částečně typově zkoušené rozvaděče (PTTA) pro spínací a řídicí zařízení nízkého napětí. Použití uvedené metodiky umožňuje realizovat tzv. částečnou typovou zkoušku rozvaděče.

Každá část proudovodné dráhy vyrobená z klasických materiálů, klade průchodu elektrického proudu odpor. Tento proud způsobuje výkonové (P) a energetické ztráty (E), což lze vyjádřit vztahy

$$P = R \cdot I^2 \text{ [W;}\Omega\text{;A]} \quad (94)$$

$$E = P \cdot t \text{ [J;W;s]} \quad (95)$$

Vnější projevem ztrátové energie je nárůst teploty proudovodné dráhy. Teplotní rozdíl mezi proudovodnou dráhou a okolním prostředím vyvolá tepelný tok Φ proudovodné dráhy do vnitřního prostředí rozvaděče. Zvýšení vnitřní teploty rozvaděče má za následek ohřev jeho krytu a vznik tepelného toku mezi krytem a vnějším prostředím. Rozložení teplot na rozhraní vnitřního a vnějšího prostředí rozvaděče je ovlivněno tepelnou vodivostí použitého materiálu a tepelně výměnnými pochody v mezní povrchové vrstvě uvnitř a vně krytu. Velikost tepelného toku procházejícího krytem rozvaděče je ovlivněna teplotní diferencí mezi vnitřním a vnějším prostředím, součinitelem prostupu tepla krytu k a jeho plochou.

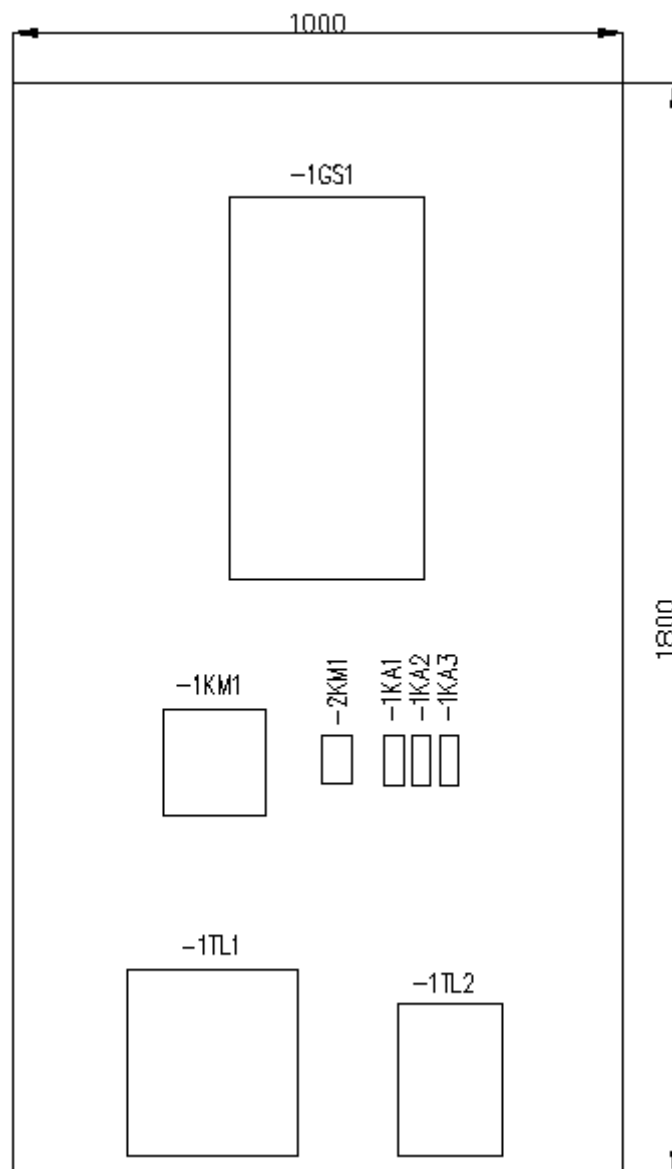
Kvantitativně lze tepelný tok popsat výrazem

$$\Phi = A \cdot k \cdot (\vartheta_i - \vartheta_c) \quad (96)$$

Φ – tepelný tok	[W]
A – plocha rozhraní	[m ²]
k – součinitel prostupu tepla	[Wm ⁻² K ⁻¹]
ϑ_i - teplota vnitřního prostředí	[°C]
ϑ_c - teplota vnějšího prostředí	[°C]

Vzhledem k tomu, že rozvaděče mohou být instalovány různými způsoby (volně stojící, nástěnné, rohové) nelze výpočet tepelného toku provádět pouze na základě znalostí součinitele přestupu tepla krytem, ale je nutno respektovat i způsob instalace rozvaděče a tepelně vyzařovacích vlastností jeho dílčích ploch. V následující části bude proveden výpočet oteplení přesně dle doporučeného postupu v IEC 890.

8.2 Výpočet ztrátového výkonu rozvaděče



Obr. 14 Návrh rozmístění přístrojů v rozvaděči

Rozvaděč:	SAREL SPACIAL 6000
Rozměry:	1800 x 1000 x 600
Krytí:	IP55
Materiál:	ocelový plech síly 1,5 mm
Povrchová úprava:	prášková kompozice odstín RAL 7032

Instalované prvky:

-1KM1	výkonový stykač LC1F185P7 $\Delta P = 12\text{ W} / \text{pól}$
-1KA1	instalační relé FINDER typ 55.32.8.230.0054 $\Delta P = 3\text{ W}$
-1KA2	instalační relé FINDER typ 55.32.8.230.0054 $\Delta P = 3\text{ W}$
-1KA3	instalační relé FINDER typ 55.32.8.230.0054 $\Delta P = 3\text{ W}$
-1TL1	síťová tkumivka VW3A4558 $\Delta P = 220\text{ W}$
-1TL2	motorová tkumivka VW3A5104 $\Delta P = 430\text{ W}$
-1GS1	frekvenční měnič ATV71HD75N4 $\Delta P = 2326\text{ W}$
-2KM1	instalační stykač LC1D09P7 $\Delta P = 0,2\text{ W} / \text{pól}$

Vzhledem ke skutečnosti, že jednotlivé prvky obvodů nebudou pracovat se jmenovitými proudy, pro které jsou ztráty uváděny, je třeba provést přepočet na skutečné ztráty ΔP_s dle skutečného proudu procházejícího prvkem. Ztrátový výkon ovládacích relé můžeme vzhledem k velmi malému pracovnímu proudu zanedbat.

$$\begin{array}{ll} -1\text{KM1} & (97) \\ \Delta P = 12 \cdot 3 = 36\text{ W} & \end{array}$$

$$\Delta P_s = \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \cdot \Delta P = \left(\frac{119,2}{185} \right)^2 \cdot 36 = 14,9\text{ W} \quad (98)$$

$$\begin{array}{ll} -1\text{TL1} & (99) \\ \Delta P = 220\text{ W} & \end{array}$$

$$\Delta P_s = \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \cdot \Delta P = \left(\frac{119,2}{184} \right)^2 \cdot 220 = 92,3\text{ W} \quad (100)$$

$$\text{-1TL2} \quad \Delta P = 430 W \quad (101)$$

$$\Delta P_s = \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \cdot \Delta P = \left(\frac{119,2}{215} \right)^2 \cdot 430 = 132,2 W \quad (102)$$

$$\text{-1GS1} \quad \Delta P = 2326 W \quad (103)$$

$$\Delta P_s = \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \cdot \Delta P = \left(\frac{119,2}{160} \right)^2 \cdot 2326 = 1290,9 W \quad (104)$$

$$\text{-2KM1} \quad \Delta P = 0,2 \cdot 3 = 0,6 W \quad (105)$$

$$\Delta P_s = \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \cdot \Delta P = \left(\frac{0,9}{9} \right)^2 \cdot 0,6 = 0,006 W \quad (106)$$

CELKOVÝ ZTRÁTOVÝ VÝKON ROZVADĚČE $\Delta P_s = 1530,3 W$

Pro tuto vypočtenou hodnotu ztrátového výkonu bude nyní proveden výpočet oteplení rozvaděčové skříně.

8.3 Stanovení účinného chladicího povrchu krytu A_e

Účinný chladicí povrch A_e krytu je součtem jednotlivých povrchů A_0 , násobeným činitelem povrchu b . Tento činitel bere zřetel na rozptyl tepla jednotlivých povrchů podle typu instalace krytu.

Tabulka III - Činitel povrchu b podle typu instalace	
Typ instalace	Činitel povrchu b
Nekrytý horní povrch	1,4
Krytý horní povrch, např. u vestavěných krytů	0,7
Nekryté boční plochy, např. čelní, zadní a boční stěny	0,9
Kryté boční plochy, např. zadní strana krytu montovaných na stěnu	0,5
Boční plochy středních krytů	0,5
Povrch podlahy	nebere se v úvahu
Fiktivní boční plochy polí (viz článek 5. 2), které byly zavedeny pouze kvůli výpočtu, se neberou v úvahu	

Tab. 4 Stanovení činitele povrchu

Horní strana rozvaděče bude nekrytá, takže činitel **b = 1,4**. Zbývající plochy jsou volně přístupné a nekryté, takže byl zvolen činitel povrchu **b = 0,9**. Spodní část rozvaděče se pro ochlazování nebere v úvahu.

část	rozměr [m]	plocha A_0 [m ²]	činitel b	$A_e = A_0 \cdot b$ [m ²]
Horní část	1 x 0,6	0,6	1,4	0,84
Přední část	1 x 1,8	1,8	0,9	1,62
Zadní část	1 x 1,8	1,8	0,9	1,62
Levá strana	0,6 x 1,8	1,08	0,9	0,972
Pravá strana	0,6 x 1,8	1,08	0,9	0,972
Celková plocha				6,02

Tab. 5 Výpočet chladicího povrchu A_e

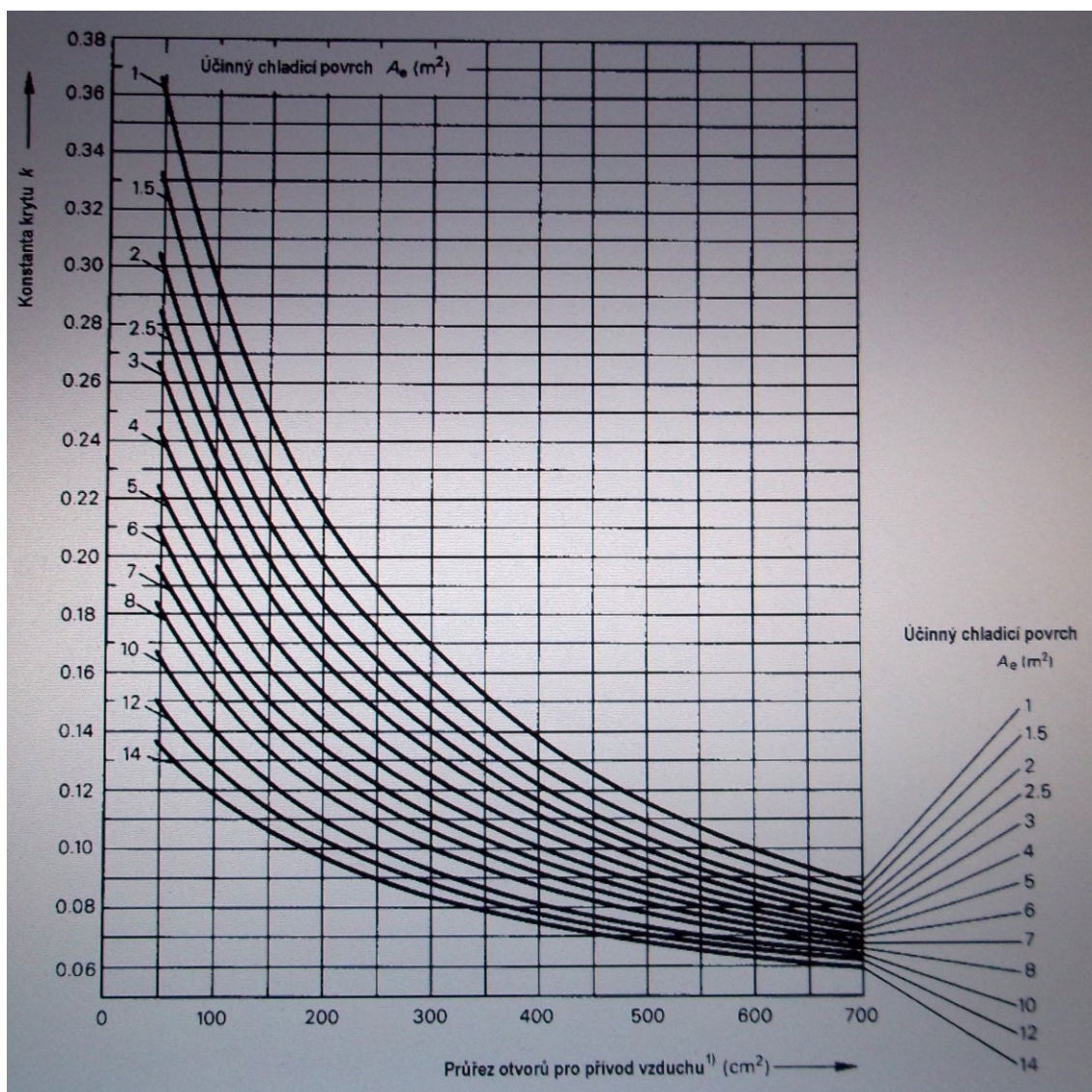
8.4 Stanovení vnitřního oteplení vzduchu ve střední výšce rozvaděče $\Delta \vartheta_{05}$

Toto oteplení se určí ze vztahu

$$\Delta \vartheta_{05} = k \cdot d \cdot P^x \quad (107)$$

kde konstanta krytů **k** zahrnuje velikost účinného chladicího povrchu v případě krytu bez ventilačních otvorů a dále průřez otvorů pro přívod vzduchu v případě krytu s ventilačními otvory.

Námi vyšetřovaný rozvaděč, bude vybaven dveřmi s ventilačními otvory o celkovém průřezu 722 cm². Na základě této skutečnosti bude proveden odečet konstanty **k** z grafu příslušné normy.



Obr. 15 Stanovení konstanty k

Z výše uvedeného grafu byla odečtena konstanta k pro chladicí povrch o velikosti $A_e = 6,02 \text{ m}^2$ a velikost ventilačních otvorů 722 cm^2 o hodnotě $k = 0,07$.

Závislost oteplení vyskytujících se uvnitř rozvaděče na efektivní tepelné ztrátě P je vyjádřena exponentem x . Exponent x je stanoven v IEC 890 pro chladicí povrch $A_e > 1,25 \text{ m}^2$ a kryt s ventilačními otvory na hodnotu 0,715.

Činitel d zahrnuje závislost oteplení na počtu vodorovných mezistěn. Pro počet mezistěn 0 je činitel $d = 1$.

Výpočet oteplení ve střední části rozvaděče

$$\Delta \vartheta_{05} = k \cdot d \cdot P^x = 0,07 \cdot 1 \cdot 1530,3^{0,715} = 13,2 \text{ K} \quad (108)$$

Teplota okolního vzduchu vně rozvaděče je dle IEC 890 stanovena na hodnotu 35°C. Tato teplota je uvažována i uvnitř rozvaděče a výsledná teplota je součtem této ustálené teploty a hodnoty vypočteného oteplení. Z toho je konečná teplota uvnitř rozvaděče ve střední výšce

$$\vartheta_{05} = 35 + 13,2 = 48,2 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (109)$$

8.5 Stanovení vnitřního oteplení vzduchu v horní části rozvaděče $\Delta\vartheta_{10}$

Výpočet se provádí podle vzorce

$$\Delta\vartheta_{10} = c \cdot \Delta t_{05} \quad (110)$$

Činitel **c** zahrnuje rozdělení teploty uvnitř rozvaděče. Jeho stanovení se mění podle provedení a instalace rozvaděče.

Činitel **c** závisí na typu průřezu otvorů pro přívod vzduchu a činiteli **f** výška/základna, kde:

$$f = \frac{h^{1,35}}{A_b} \quad (111)$$

kde:

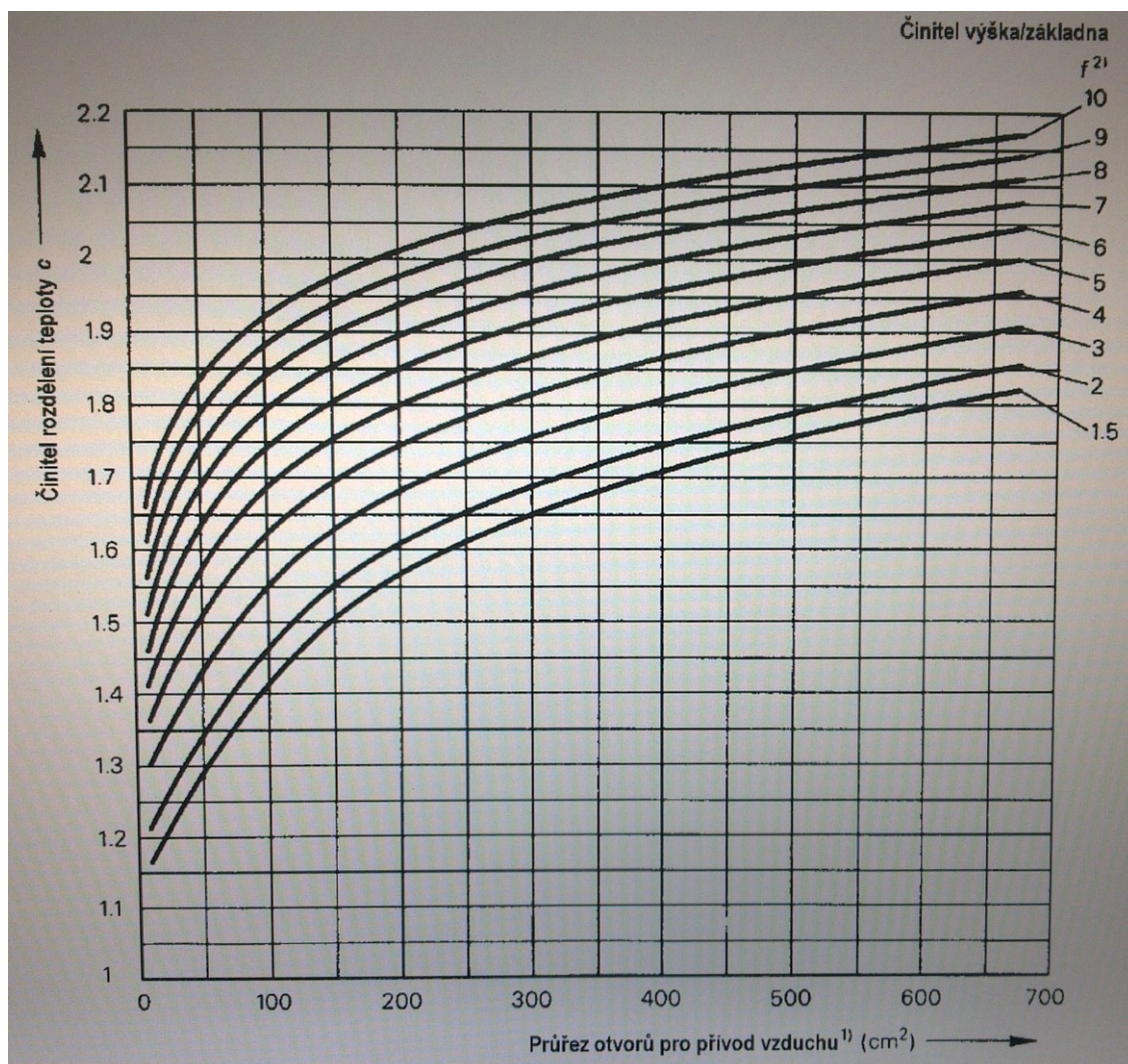
h je výška krytu v metrech

A_b plocha povrchu základny krytu v metrech čtverečných

$$A_b = 1 \cdot 0,6 = 0,6 \text{ m}^2 \quad (112)$$

$$f = \frac{1,8^{1,35}}{0,6} = 3,6 \quad (113)$$

Nyní se provede odečet činitele **c** pro kryt s ventilačními otvory a hodnotu činitele **f** = **3,6** z následujícího grafu.



Obr. 16 Stanovení konstanty c

Z uvedených charakteristik a vypočtené hodnoty činitele f byla odečtena konstanta $c = 1,9$. Nyní se uvedená hodnota použije pro výpočet oteplení v horní části rozvaděče.

$$\Delta \vartheta_{10} = c \cdot \Delta t_{05} = 1,9 \cdot 13,2 = 25,08 \text{ K} \quad (114)$$

Toto oteplení se opět vztahuje k uvažované teplotě okolí 35°C takže výsledná teplota v horní části rozvaděče bude

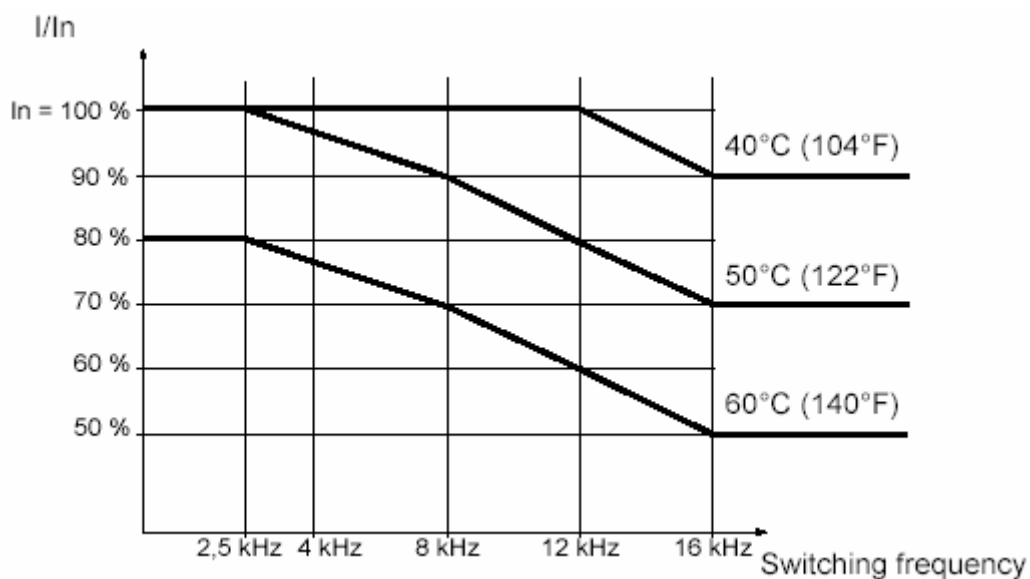
$$\vartheta_{10} = 35 + 25,08 = 60,08 \text{ }^\circ\text{C} \quad (115)$$

Na základě vypočtených hodnot byly posouzeny jednotlivé instalované prvky, zda dle výrobce mohou bezpečně pracovat v rozmezí uvedených teplot.

Prvek	Typ	Provozní teplota	Max. vypočtená teplota	Závěr
Stykač –1KM1	LC1F185P7	-5 ÷ 55 °C	48,2 °C	vyhovuje
Měnič frekvence –1GS1	ATV71HD75N4	-10 ÷ 50 °C	60,08 °C	nevyhovuje
Tlumivka –1TL1	VW3A4558	70 °C	48,2 °C	vyhovuje
Tlumivka –1TL2	VW3A5104	70 °C	48,2 °C	vyhovuje
Relé -1KA1	FINDER typ 55	85 °C	48,2 °C	vyhovuje
Relé -1KA2	FINDER typ 55	85 °C	48,2 °C	vyhovuje
Relé -1KA3	FINDER typ 55	85 °C	48,2 °C	vyhovuje

Tab. 6 Provozní vlastnosti instalovaných prvků

Z uvedených výsledků je zřejmé, že mezní teploty pro spolehlivé a bezpečné provozování u jednotlivých instalovaných prvků byly dodrženy, s výjimkou frekvenčního měniče. Zde byla teplota překročena. V tomto případě předepisuje výrobce měniče redukcí zatížení dle níže uvedeného grafu.



Obr. 17 Redukce jmenovitého proudu měniče v závislosti na teplotě okolí

V grafu se budeme pohybovat po křivce zobrazující teplotu 60 °C a z průběhu můžeme vyčíst, že při vypočtené teplotě a spínací frekvenci 4 kHz musí být provedena redukce proudu měniče na hodnotu přibližně 78% I_n . Kontrolní výpočet provedeme na maximální vypočtený proud motoru a na vypočtený efektivní proud motoru ve čtvrté vrstvě. V této vrstvě lan je motor zatěžován nejvyšším momentem a tomu odpovídá i vypočtený maximální proud motoru.

$$I_{motormax} \Rightarrow \sqrt{\left(\frac{M_{motormax}}{M_{motorn}}\right)^2 \cdot (I_{motorn}^2 - I_{\mu n}^2) + I_{\mu n}^2} \quad (116)$$

Magnetizační proud $I_{\mu n}$ určíme dle výrobce motoru pomocí vztahu:

$$I_{\mu n} = 0,41 \cdot I_{motorn} = 0,41 \cdot 140 = 57,4 A \quad (117)$$

$$\begin{aligned} I_{motormax} &\Rightarrow \sqrt{\left(\frac{800,4}{971}\right)^2 \cdot (140^2 - 57,4^2) + 57,4^2} = \\ &= \sqrt{0,67 \cdot 16305,24 + 3294,76} = 119,2 A \end{aligned} \quad (118)$$

$$\begin{aligned} I_{motoreff} &\Rightarrow \sqrt{\left(\frac{588,88}{971}\right)^2 \cdot (140^2 - 57,4^2) + 57,4^2} = \\ &= \sqrt{0,36 \cdot 16305,24 + 3294,76} = 95,7 A \end{aligned} \quad (119)$$

Z uvedených výpočtů bereme v úvahu větší hodnotu proudu $I_{motormax} = 119,2 A$. Tato hodnota představuje 74,5% procent jmenovitého proudu frekvenčního měniče a je pod hranicí hodnoty 78% čímž jsme dodrželi požadovanou redukci proudu.

Závěrem můžeme konstatovat, že výpočet pro oteplení rozvaděče vyhověl ve všech požadovaných bodech.

Výpočet byl proveden pro nejnepříznivější případ oteplení a to s provozem ve čtvrté vrstvě při navinuté celé délce lana a maximálním zdvihu. Provozování vrátku v této oblasti je v praxi velmi nepravděpodobné, ale při výpočtech byl tento stav brán jako maximálně možný.

Kontrola na oteplení byla provedena dle IEC 890 pro pasivně chlazený rozvaděč. Norma nedefinuje postup výpočtu pro rozvaděče chlazené pomocí zabudovaných chladících ventilátorů. Tyto stavy se dají například vypočíst pomocí principu tepelné sítě, ale vzhledem k proudění vnitřního vzduchu a poměrům v rozvaděči by byl výpočet značně složitý a v praxi se neprovádí. V našem případě se s instalací ventilátoru a topení předem počítalo z důvodu vytvoření příznivých tepelných parametrů uvnitř skříně během provozu zařízení a proto bude kontrola oteplení provedena navíc pomocí počítačového softwaru PROCLIMA 4.0 od firmy Schneider-electric, která vyrábí a dodává i rozvaděče typu SAREL.

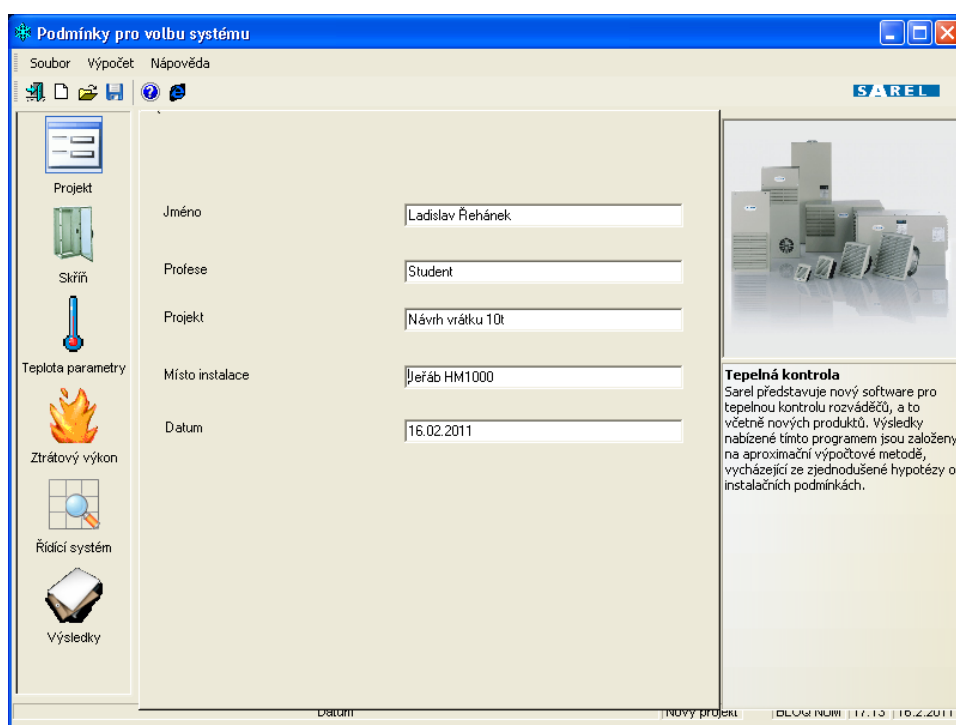
9. Kontrola oteplení rozvaděče softwarem PROCLIMA

Růst podílu elektroniky v přístrojích, miniaturizace komponentů a vstup výkonové elektroniky do spínacích a ovládacích prvků znamenají, že je nutno zabývat se kontrolou a řízením vnitřní teploty rozvaděčů.

Dva určující faktory v procesu průmyslu jsou spolehlivost a hledání stavu minimální poruchovosti. Každá porucha má za následek určité ztráty. Proudová zatížitelnost a životnost elektrických komponentů samotných přímo závisí na teplotě a vlhkosti uvnitř rozvaděče. Řešení těchto problémů jsou různá a závisí na podmínkách prostředí, typu zařízení v rozvaděči a samozřejmě ceně. V určitých případech je dostačující použít větší rozvaděč, nebo ventilátor. V případech, kdy jsou teploty vyšší, musíme instalovat chlazení, např. výměníky vzduch/vzduch, výměníky vzduch/voda nebo chladicí jednotky. Rozvaděčové systémy SAREL nabízí široký rozsah řešení přizpůsobené všem možným požadavkům, tzn. od jednoduchých samoventilačních mřížek, přes ventilátory, topení, prvky regulace, výměníky až po chladicí jednotky.

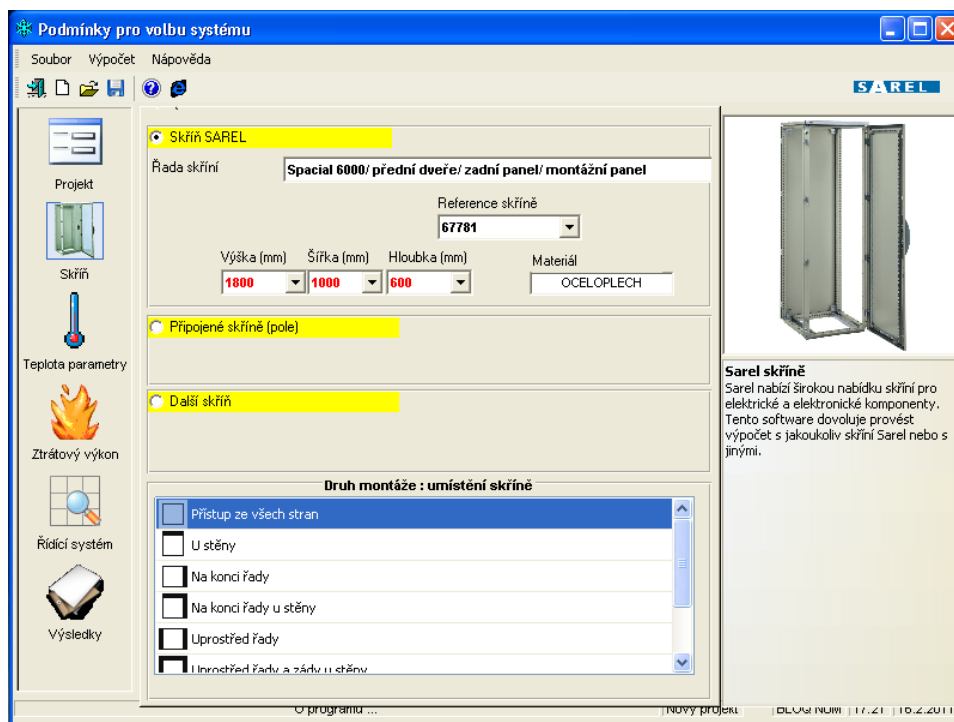
Software PROCLIMA vytvoří tepelnou bilanci a určí nejvhodnější řešení ventilace, chlazení a vytápění řešeného rozvaděče.

Při spuštění programu se zadají požadované údaje o projektu do menu na úvodní obrazovce.

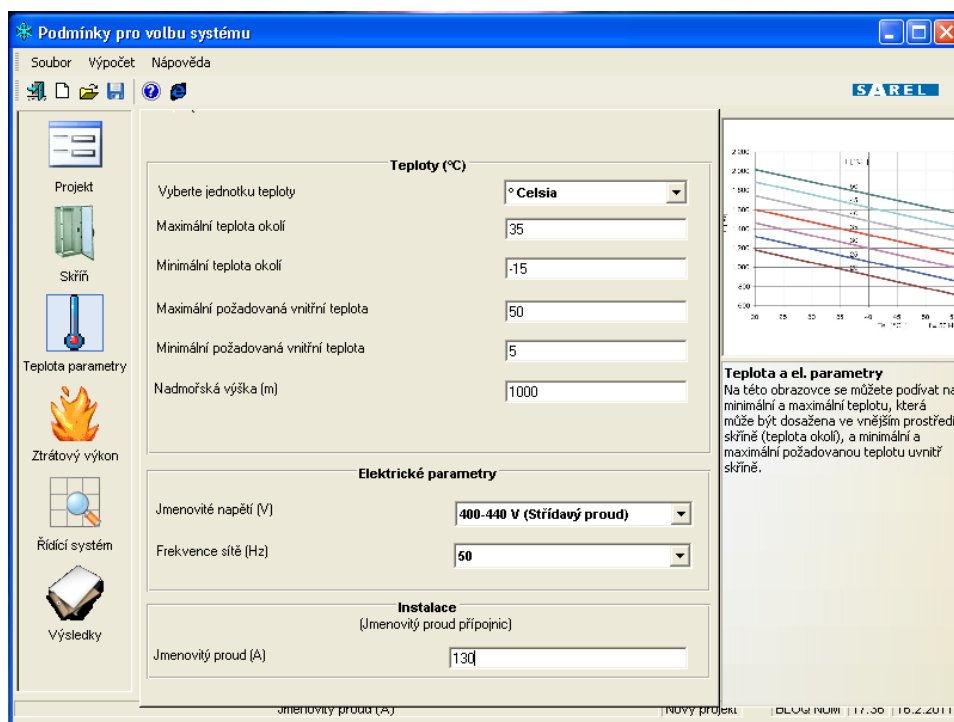


Obr. 17 Úvodní obrazovka

Následuje výběr rozvaděčové skříně a zadání teplotních parametrů návrhu

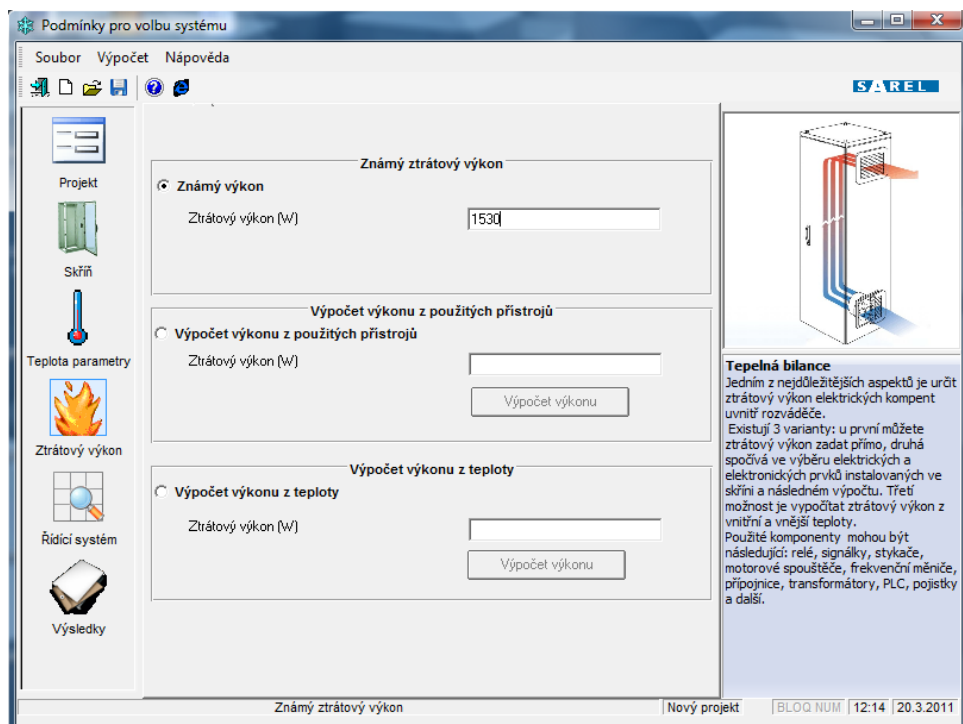


Obr. 18 Výběr skříně a určení jejich parametrů

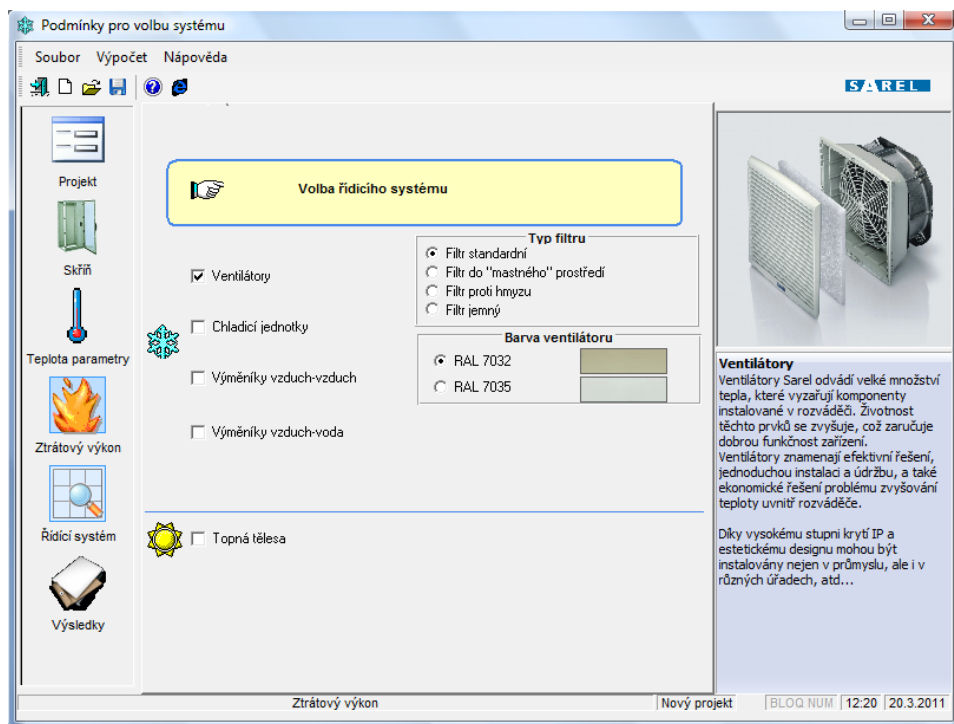


Obr. 19 Teplotní parametry návrhu

V dalším kroku pokračujeme v zadání vypočteného ztrátového výkonu a řídicího systému

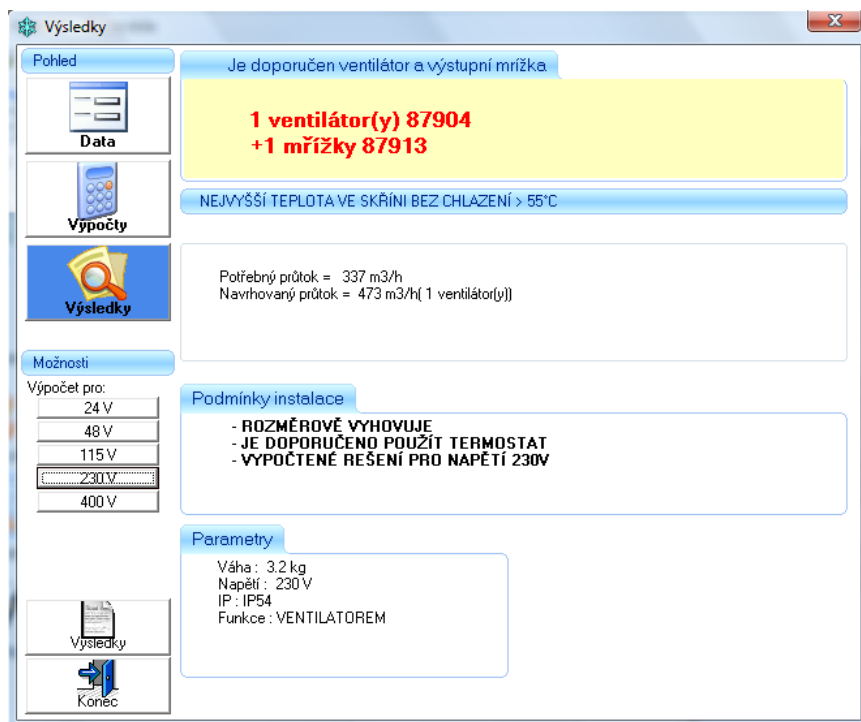


Obr. 20 Zadání vypočteného ztrátového výkonu



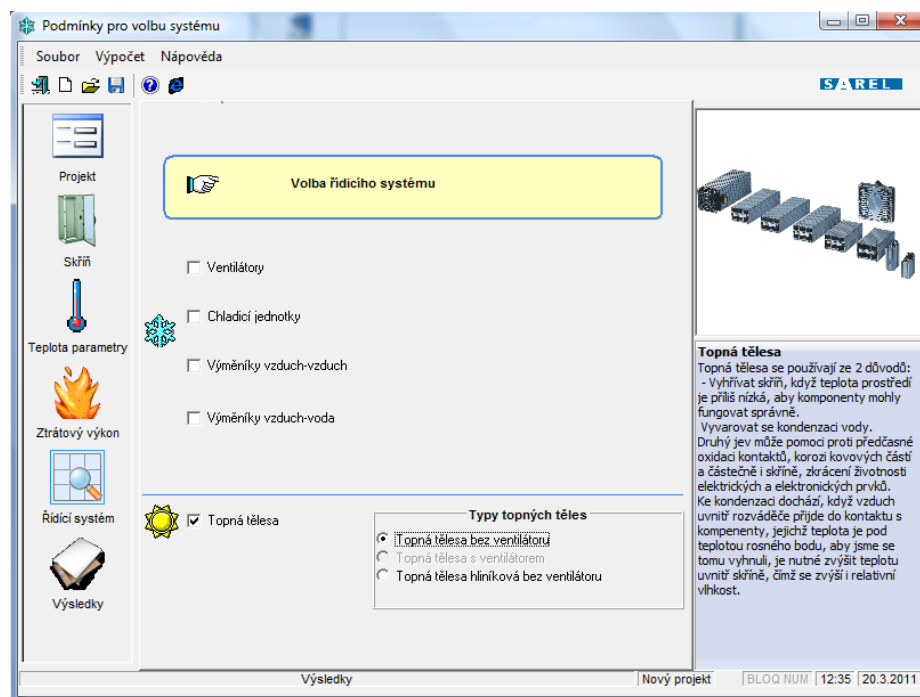
Obr. 21 Volba řídicího systému pro chlazení

Vyhodnocení zadání pro napájecí napětí ventilátoru 230V AC



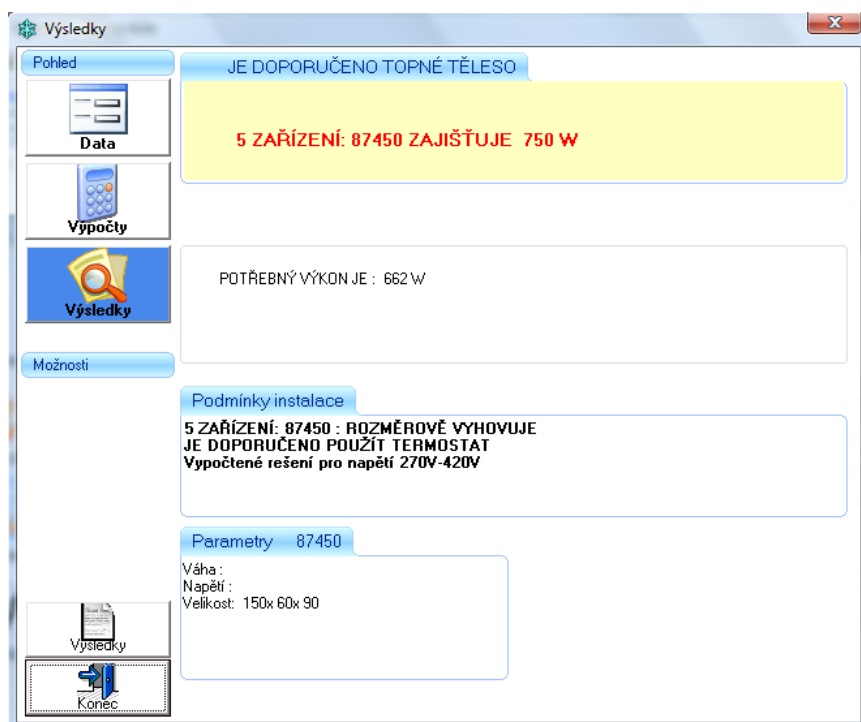
Obr. 22 Konečný návrh chlazení skříně

Nyní provedeme volbu řídicího systému pro temperování skříně



Obr. 23 Volba řídicího systému pro vytápění

Vyhodnocení zadání pro temperování skříně



Obr. 24 Konečný návrh vytápění skříně

Na závěr výpočtu může být konstatováno, že výběr rozvaděčové skříně pro zadanou aplikaci je správně navržen, neboť při vypočteném ztrátovém výkonu a použití doporučených komponentů pro chlazení a vytápění se pohybuje vnitřní teplota v námi zadaném intervalu $5 \div 50$ °C. Při použití doporučeného ventilátoru navíc nemusíme provádět redukci proudu měniče, což by bylo nutno jinak akceptovat při pasivním chlazení skříně, jak je zřejmé z uvedeného výpočtu dle IEC 890.

10. Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout optimální řešení pohonu a řízení zdvihového vrátku 10t.

V prvním kroku bylo nutno prostudovat výkresovou dokumentaci včetně technického popisu, abych se seznámil se současným stavem elektrického i strojního zařízení. Tato činnost byla provedena v prostorech provozovatele zařízení, včetně konzultace s pracovníky obeznámenými s dotýcnou problematikou.

Následně jsem provedl vyhodnocení získaných dat a navrhnul technické řešení. Dle dohody byl tedy současný asynchronní elektromotor s kotvou kroužkovou a osovou výškou 280 mm nahrazen třífázovým asynchronním elektromotorem s kotvou nakrátko. Z vypočtených parametrů vzešel elektromotor s osovou výškou 315 mm, což bylo provozovatelem akceptováno a na strojní konstrukci bude provedena příslušná úprava.

Pro řízení elektromotoru jsem vybral frekvenční měnič ALTIVAR 71, který je dle výrobce vhodný k napájení a řízení zdvihových aplikací. Řízení zdvihu pomocí frekvenčního měniče se v současné době používá velmi často, neboť pohon má dostatek momentu i při nízkých rychlostech a při polohování lze docílit vysoké přesnosti. Dostatečnou přesnost při provozu zdvihu zabezpečuje navržená zpětná vazba realizována pomocí inkrementálního čidla 1XP8 001-1. Měnič bude nastaven pro vektorové řízení, které je obzvláště vhodné při dynamických aplikacích.

Na závěr jsem provedl kontrolu oteplení navrženého rozvaděče. V celém prostoru rozvaděče nebude při provozu zařízení překročena teplota 55 °C, což byla hodnota, která byla zadána do výpočetního programu jako maximálně možná. Tato teplota byla zvolena v závislosti na hodnotě, kterou udává výrobce frekvenčního měniče pro spolehlivý provoz tohoto zařízení.

Celkové řešení je zřejmé z výkresové dokumentace, která je součástí této diplomové práce. Při zpracování dokumentace byly dodrženy jak podmínky uvedené v jednotlivých technických normách pro elektrická a strojní zařízení, tak požadavek provozovatele na jednoduché řešení, výběr dodavatelů a činnost stroje.

11. Seznam použité literatury a podkladů

- [1] *Projektování v elektrotechnice*, Ostrava 2005, učební texty VŠB-TUO
- [2] Český normalizační institut.: *Technické normy týkající se elektrických zařízení a všeobecné bezpečnosti v elektrotechnice řady 33 2000*, Praha
- [3] Vrána, V., Neborák, I.: *Elektrické pohony*, Ostrava: 1990. ISBN 80-7078-062-2
- [4] Kümmel, F.: *Elektrické pohony úlohy a riešenia*, Bratislava: 1989. ISBN 80-05-00081-2
- [5] Telemecanique: *Ovládací a signalizační přístroje Hormony*, [katalogová dokumentace], Praha 2008.
- [6] Telemecanique: *Frekvenční měniče pro asynchronní motory*, [katalogová dokumentace], Praha 2006.
- [7] Schneider Electric: *Vypínače, Stykače, Spouštěče, Pojistky*, [katalogová dokumentace], Praha 2008.
- [8] Siemens s.r.o.: *Nízkonapětové motory*, [katalogová dokumentace], Praha 2008.
- [9] Schneider Electric: *PROCLIMA 4.0*, [počítačový program pro výpočet oteplení rozváděčových skříní SAREL], ver.4.0, velikost 2,16MB, 1998
- [10] SIEMENS: *Application Manual, Edition 09.99*, 1999

12. Seznam příloh

- Příloha I. - Obvodové schéma silových obvodů 1. část (výkres AutoCad 2008)
- Příloha II. - Obvodové schéma silových obvodů 2. část (výkres AutoCad 2008)
- Příloha III. - Obvodové schéma ovládacích obvodů 1. část (výkres AutoCad 2008)
- Příloha IV. - Obvodové schéma ovládacích obvodů 2. část (výkres AutoCad 2008)